



TUGAS AKHIR - SF 141501

PERSEBARAN HIPOSENTER MALUKU SELATAN MENGUNAKAN METODE *DOUBLE DIFFERENCE*

Ryandi Bachrudin Yusuf
NRP.1112.100.090

Dosen Pembimbing
Prof.Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, S.U

Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - SF 141501

HYPOCENTER DISTRIBUTION OF SOUTH MALUKU USING DOUBLE DIFFERENCE METHOD

Ryandi Bachrudin Yusuf
NRP.1112.100.090

Advisor Lecturer
Prof.Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, S.U.

Physics Department
Faculty of Mathematics and Sciences
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

LEMBAR PENGESAHAN

PERSEBARAN HIPOSENTER MALUKU SELATAN MENGUNAKAN METODE *DOUBLE DIFFERENCE*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Sains Pada Bidang Fisika Bumi
Program Studi S-1 Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Disusun Oleh :

Ryandi Bachrudin Yusuf
NRP.1112.100.090

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir

Prof.Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, S.U

(.....)



PERSEBARAN HIPOSENTER MALUKU SELATAN MENGUNAKAN METODE *DOUBLE DIFFERENCE*

Nama : Ryandi Bachrudin Yusuf
NRP : 1112.100.090
Jurusan : Fisika FMIPA ITS
Pembimbing : Prof.Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, S.U

Abstrak

Wilayah Maluku Selatan merupakan wilayah bagian timur Indonesia dengan potensi gempa yang tinggi. Salah satu penyebab daerah ini rawan gempa adalah tatanan lempeng tektonik yang masuk dalam zona tektonik kompleks, yaitu zona pertemuan lempeng Eurasia, lempeng Filipina, dan lempeng Pasifik, serta pada bagian Pulau Seram merupakan perbatasan zona subduksi lempeng Indo-Australia. Sebagai upaya mitigasi bencana gempa bumi, perlu adanya studi kegempaan berupa relokasi hiposenter dan menganalisa persebaran hiposenter di wilayah Maluku Selatan. Prinsip metode double difference ini adalah jika ada dua gempa yang saling berdekatan, dimana jarak relative antar gempa lebih kecil daripada jarak relative gempa ke stasiun perekam, maka raypath dan waveform dapat dianggap sama, sehingga kesalahan akibat model kecepatan bisa diminimalkan. Hasil relokasi menggunakan metode double difference mampu memberikan hasil yang lebih akurat, hal ini ditunjukkan dengan nilai RMS hasil relokasi yang jauh lebih baik (mendekati nol) dibandingkan dengan nilai RMS sebelum relokasi. Persebaran hiposenter gempa banyak terjadi dekat patahan, dan zona subduksi lempeng, pergeseran episenter lebih terkumpul pada satu titik dan kedalaman hiposenter lebih tersebar (keluar dari fixed depth) didominasi antara 2-50 Km.

Kata kunci: *Double difference, Maluku Selatan, persebaran, relokasi hiposenter, residual*

HYPOCENTER DISTRIBUTION OF SOUTH MALUKU USING DOUBLE DIFFERENCE METHOD

Name : Ryandi Bachrudin Yusuf
NRP : 1112.100.090
Advisor : Prof.Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, S.U.

Abstract

South Maluku is the eastern part of Indonesia with high earthquake potential. One of the reason that caused it happen is setting of tectonic plates on South Maluku the complex tectonic zone, a collision zone of the Eurasian plate, Philippine plate and the Pacific plate, and on the Seram Island is the subduction zone of the Indo-Australian plate. Therefore earthquake disaster, need a studies seismology in order to mitigation, with relocation hypocenter and distribution analyze in the region of South Maluku. The principle of double difference method if there were two earthquakes pair to each other, where the relative distance between the earthquake is smaller than the distance relative to the seismic recording station, then raypath and waveform can be considered similar, so the errors due to velocity models can be minimized. The result of using the method of double difference relocation is able to provide more accurate results, as shown by the RMS value of the relocation results much better (close to zero) than the RMS value before relocation. Distribution of earthquake hypocenter occur near faults and plate subduction zones, shifting the epicenter location is collected at one point and the depth of the hypocenter is spread (out of the fixed depth) dominated between 2-50 Km.

Keywords: *Distribution, double difference, hypocenter relocation, RMS, South of Maluku*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir dengan judul **“Persebaran Hiposenter Maluku Selatan Menggunakan Metode *Double Difference*”**

Dalam penulisan ini tidak lepas dari bantuan-bantuan dari pihak-pihak terkait baik membantu secara langsung maupun secara tidak langsung. Dalam kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan banyak terima kasih kepada pihak-pihak tersebut, diantaranya :

1. Bapak Prof.Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, S.U selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, ilmu, saran, serta kritik yang bersifat membangun sehingga laporan ini dapat selesai dengan baik.
2. Bapak Bachtera Indarto, M.Si selaku dosen wali semester 3 hingga semester 8 atas semua kritik, saran dan masukan selama penulis melakukan perwalian dan berkuliah di Jurusan Fisika ITS.
3. Bapak Dr. Yono Hadi Pramono, M. Eng selaku Kepala Jurusan Fisika ITS dan dosen wali semester 1 dan 2 selama penulis berkuliah di Jurusan Fisika ITS.
4. Ayah (Alm), Mama, Mas, dan Adik tercinta, serta semua keluarga yang senantiasa mendoakan penulis dalam penyusunan laporan ini.
5. Yuli Setyaningrum, selaku teman yang selalu mendoakan, mendorong, dan memberi semangat, serta menemani penulis hingga selesainya laporan tugas akhir ini.
6. Team HYPODD Ceria (Dyahnur, Dewi, Chichi) selaku *partner* dalam pengerjaan laporan ini dari awal hingga selesai.
7. Teman-teman FBI 2012 yang memberikan semangat, dorongan serta canda tawa di setiap harinya.

8. Grup Kontrakan CIOK (Habib, Wildan, Beta, Yayan, Falah) awkmk kabeh ancen gendeng rek !
9. Warga Jurusan Fisika ITS yang memberikan semangat, dan mengisi hari-hari di Jurusan Fisika ITS.
10. Grup Lab Spektro (Mas Slamet, dan teman-teman 2012) yang mengizinkan penulis melakukan pengerjaan di dalam Lab Spektro.
11. Keluarga Besar Lab Geofisika ITS yang sangat membantu dalam penyusunan laporan ini serta mau berbagi ilmu kepada penulis.
12. Laboran dan karyawan tata usaha Jurusan Fisika ITS

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih terdapat banyak sekali kekurangan. Penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi lebih baiknya laporan tugas akhir ini. Akhir kata, semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat untuk kedepannya. Wassalamualaikum wr. wb.

Surabaya, 11 Juli 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xii
 BAB I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
 BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Gempa Bumi	5
2.2 Tatahan Tektonik Maluku Selatan	6
2.3 Gelombang P dan S	7
2.4 Persamaan Gelombang P dan S	10
2.5 <i>Fault</i>	13
2.6 Invers Perhitungan Hiposenter	16
2.7 Metode <i>Double Difference</i>	19
2.8 <i>Ray Tracing</i>	21
 BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir Penelitian	27
3.2 Deskripsi Diagram Alir	28

BAB IV. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Seismisitas Wilayah Maluku Selatan	37
4.2 Relokasi Metode <i>Double Difference</i>	38
4.3 Analisa Hasil Relokasi Hiposenter	42
4.4 Perhitungan RMS Hasil Relokasi Hiposenter	44
4.5 Analisa Persebaran Hiposenter	47
 BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	53
5.2 Saran	53
 DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN	57
BIODATA PENULIS	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Tatanan tektonik Indonesia Bagian Timur	7
Gambar 2.2	Mekanisme penjalaran gelombang badan Primer	9
Gambar 2.3	Mekanisme penjalaran gelombang badan Sekunder	9
Gambar 2.4	Parameter untuk mendeskripsikan gerakan patahan	14
Gambar 2.5	Prinsip mekanisme patahan	15
Gambar 2.6	Ilustrasi dari algoritma relokasi gempa <i>double difference</i>	21
Gambar 2.7	<i>Ray Tracing</i>	22
Gambar 2.8	Ilustrasi skema 3 titik perturbasi	24
Gambar 2.9	Contoh Skema urutan perturbasi titik dari kiri ke kanan yang digunakan dalam algoritma <i>ray tracing</i> dan dari kiri dan kanan menuju ke tengah	25
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	27
Gambar 3.2	Ekstraks data gempa	29
Gambar 3.3	Picking gelombang P	30
Gambar 3.4	<i>Running ph2dt</i>	33
Gambar 3.5	<i>Running hypoDD</i>	35
Gambar 4.1	Peta Persebaran Gempa Bumi dan Stasiun perekam di wilayah Maluku Selatan	37
Gambar 4.2	Hasil <i>running</i> program <i>ph2dt</i>	39
Gambar 4.3	Hasil <i>running</i> program <i>hypoDD</i>	41
Gambar 4.4	Plot peta hiposenter sebelum direlokasi	42
Gambar 4.5	Plot peta hiposenter sesudah direlokasi	43
Gambar 4.6	Plot peta epicenter sebelum dan sesudah direlokasi	43
Gambar 4.7	Histogram nilai RMS sebelum relokasi	45
Gambar 4.8	Histogram nilai RMS sesudah relokasi	46
Gambar 4.9	Pola persebaran hiposenter	47
Gambar 4.10	Diagram kompas	48

Gambar 4.11	Diagram rose	49
Gambar 4.12	Analisa persebaran berdasarkan penampang vertikal dengan kondisi hiposenter sebelum direlokasi	50
Gambar 4.13	Analisa persebaran berdasarkan penampang vertikal dengan kondisi hiposenter sesudah direlokasi	50

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kepulauan Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng aktif dunia, yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia, dan lempeng Pasifik. Hal ini menyebabkan Indonesia termasuk dalam daerah dengan potensi gempa yang cukup tinggi, tercatat lebih dari 14.000 event gempa bumi yang terjadi di Indonesia sejak tahun 1900-2000 (Tim Revisi Peta Gempa Indonesia, 2010). Gempa bumi merupakan peristiwa pelepasan energi secara tiba-tiba yang merupakan salah satu sumber terjadinya penjalaran gelombang seismik. Salah satu wilayah di Indonesia yang bisa dibilang mempunyai potensi gempa yang cukup tinggi adalah Indonesia bagian Timur, termasuk daerah Maluku Selatan. Sehingga pada penelitian tugas akhir ini dikhususkan di daerah Maluku Selatan (Ibrahim dan Subardjo, 2003).

Maluku Selatan termasuk dalam zona tektonik kompleks, karena merupakan pertemuan tiga lempeng yaitu lempeng Eurasia, lempeng Pasifik, dan lempeng Filipina, serta pada bagian utara Pulau Seram merupakan batas zona subduksi lempeng Indo-Australia.. Secara tektonik dan kondisi geologinya, wilayah ini dipengaruhi oleh subduksi Busur Banda di utara, *thrust* Laut Seram di selatan, subduksi lempeng Laut Maluku, serta sesar Sula-Sorong di selatan. Tercatat lebih dari 160 event gempa bumi dimulai sejak Januari 2000 sampai Februari 2016 yang dapat terekam oleh stasiun perekam gempa. Dari potensi gempa yang sering terjadi, perlu adanya studi kegempaan berupa relokasi hiposenter sebagai upaya mitigasi bencana. Salah satu metode yang dapat dilakukan untuk relokasi hiposenter adalah menggunakan metode *double difference (DD)* (Tim Revisi Peta Gempa Indonesia, 2010).

Metode *double difference (DD)* adalah metode penentuan lokasi hiposenter dengan menggunakan data waktu tempuh antara pasangan gempa ke suatu stasiun perekam gempa. Prinsip metode ini jika jarak antara dua gempa yang dipasangkan lebih kecil

dibandingkan dengan jarak masing-masing gempa ke stasiun perekam, maka *raypath* dan *waveform* kedua gempa itu dianggap sama. Dengan asumsi ini, maka diferensial waktu tempuh (*travel time*) antara dua gempa yang terekam pada stasiun yang sama dapat dianggap sebagai fungsi jarak antara kedua hiposenter. Sehingga pada kesempatan ini, penulis memiliki keinginan untuk melakukan penelitian tugas akhir untuk relokasi hiposenter menggunakan metode *double difference*, serta untuk mengidentifikasi persebaran hiposenter menggunakan metode *double difference* (Waldhauser and Ellsworth, 2000).

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana relokasi hiposenter menggunakan metode *double difference*?
2. Bagaimana persebaran hiposenter di Maluku Selatan menggunakan metode *double difference*?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Data gempa di Maluku Selatan periode 18 Januari 2000 – 25 Februari 2016.
2. Magnitudo minimum gempa 4.8 SR.
3. Relokasi menggunakan metode *double difference*.
4. Model kecepatan Maluku.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini adalah

1. Relokasi hiposenter menggunakan metode *double difference*.
2. Persebaran hiposenter di daerah Pulau Seram menggunakan metode *double difference*.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman tentang relokasi gempa bumi, dan menjadi daya Tarik untuk melakukan penelitian pada daerah rawan gempa lainnya yang ada di Indonesia maupun di luar Indonesia.

1.6 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini dapat diuraikan sebagai berikut:

Bab I – Pendahuluan, berisi uraian mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika laporan.

Bab II – Tinjauan Pustaka, berisi uraian mengenai teori sebagai acuan, dan pendukung dalam penelitian ini.

Bab III – Metodologi Penelitian, berisi uraian mengenai metode, alur dan penjelasan alur dalam penelitian ini.

Bab IV – Analisa dan Pembahasan, berisi uraian mengenai analisa, hasil serta pembahasan dalam penelitian ini.

Bab V – Kesimpulan dan Saran, berisi uraian mengenai hasil yang telah dicapai, dan saran yang bersifat membangun untuk penelitian ini kedepannya.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Gempa Bumi

Gempa bumi adalah getaran asli dari dalam bumi, bersumber di dalam bumi yang kemudian merambat ke permukaan bumi akibat rekahan bumi pecah dan bergeser dengan keras. Penyebab gempa bumi salah satunya bisa berupa pergerakan tektonik. Gempa bumi tektonik merupakan gempa bumi yang paling sering terjadi, merupakan getaran yang dihasilkan dari peristiwa patahnya batuan akibat tumbukan lempeng tektonik yang secara perlahan mengakumulasi energy tumbukan tersebut hingga melampaui batas kekuatan batuan (Arief, 2010). Setiap terjadinya gempa bumi akan menimbulkan kerusakan yang sangat hebat, intensitas gempa bumi dapat didefinisikan sebagai suatu ukuran deskriptif akibat guncangan selama gempa terjadi. Sedangkan magnitudo adalah ukuran logaritmik dari kekuatan gempa bumi atau ledakan yang berdasarkan pengukuran amplitude maksimum fasa seismik, kemudian magnitudo dihitung secara skala relatif terhadap suatu kekuatan gempa bumi. Magnitudo tidak berhubungan langsung dengan sumber gempa dan bertujuan untuk penyediaan perhitungan cepat sederhana untuk analisis peninjauan awal dari data gempa (katalog) (Afnimar, 2009).

Lokasi gempa didefinisikan oleh tiga koordinat ruang dan waktu terjadinya gempa (*origin time*). Dalam koordinat kartesian dinyatakan sebagai (x,y,z,t_0) dan koordinat bola dinyatakan sebagai (r,θ,ϕ,t_0) (Afnimar, 2009). Dari berbagai pengamatan gempa bumi, maka diyakini adanya suatu tempat di mana gempa bumi bermula. Tempat tersebut disebut sebagai hiposenter atau sumber gempa. Tempat di permukaan bumi yang tepat di atas hiposenter disebut sebagai episenter. Berdasarkan teori Reid mengenai *elastic rebound*, gempa bumi bermula dari gerakan *slip* yang terjadi secara spontan sesar aktif karena akumulasi *strain elastic* dalam periode panjang untuk mencari kestabilan baru (Arief, 2010).

Gempa bumi akan menghasilkan informasi seismik berupa

rekaman sinyal berbentuk gelombang yang setelah melalui proses manual atau non-manual akan menjadi data bacaan fase (*phase reading data*). Informasi seismik selanjutnya mengalami proses pengumpulan, pengolahan dan analisis sehingga menjadi parameter gempa bumi. Parameter gempa bumi tersebut meliputi : Waktu kejadian gempa bumi, Lokasi episenter, Kedalaman sumber gempa bumi, Kekuatan gempa bumi, dan Intensitas gempa bumi.

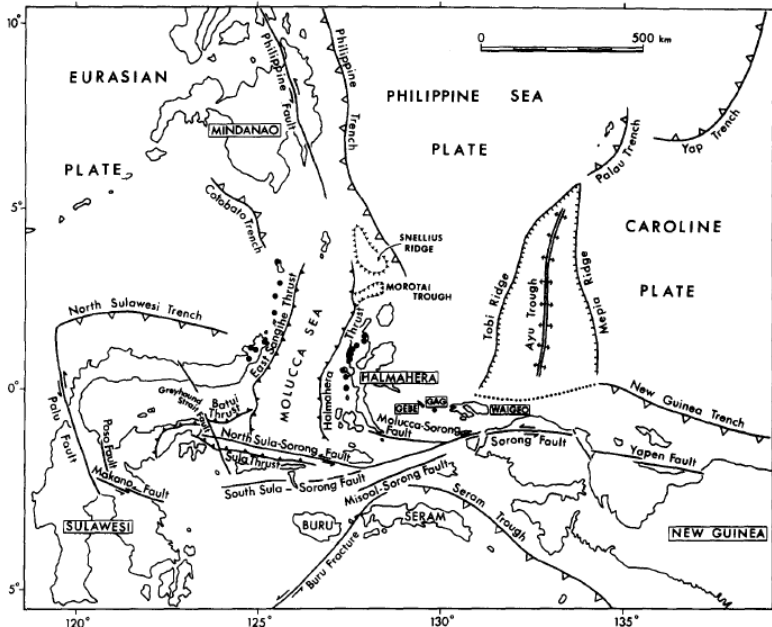
2.2 Tataan Tektonik Maluku Selatan

Maluku merupakan daerah yang kerap terjadi gempa bumi tektonik, karena daerah Maluku termasuk dalam zona tektonik kompleks, yaitu terletak pada pertemuan beberapa lempeng tektonik, yaitu lempeng Filipina dari timur, lempeng Eurasia dari barat, dan lempeng Pasifik dari arah timur, serta wilayah Pulau Seram yang berbatasan dengan zona subduksi lempeng Indo-Australia. Daerah Maluku Selatan meliputi pulau Seram dan Laut Banda (Hall, 1991).

Pulau Seram merupakan bagian dari luar laut Banda bagian non-vulkanik. Pulau Seram merupakan terusan dari Timor, yang sebelumnya terletak pada zona tumbukan antara lempeng Australia dan zona subduksi Banda, dimana lempeng Australia bergerak ke arah zona subduksi Banda. Lempeng Australia terbentuk dari pecahnya daratan Gondwana pada zaman *Jurassic* (Powel, 1976; Veevers, 1982). Zona subduksi banda dihasilkan dari subduksi laut Banda vulkanik yang berlokasi di utara lempeng Australia, pada zaman Eosen (Hartono, 1990). Waktu tumbukan antara lempeng Australia dan Busur Banda masih menjadi kontroversi bagi beberapa ilmuwan.

Tataan tektonik pada zaman Neogen dari Busur Banda merupakan interaksi antara tiga lempeng yaitu lempeng Eurasia yang bergerak ke arah timur, lempeng Pasifik bergerak ke arah barat, dan lempeng Australia bergerak ke arah utara. Pulau Seram diyakini adalah bagian dari lempeng Australia (Hamilton, 1979; Piagam dan Paggabeau, 1984). Sebelumnya, zaman Miosen, Busur Banda berlokasi di NE dari pulau Tanimbar (Linthout *et al.*, 1996) dan

sekarang bergerak berpindah NW mendekati lempeng Pasifik. Di awal Pliosen, Seram adalah sebuah *block-fault* dan berotasi menjadi EW, hingga sekarang (Linhout *et al.*, 1996).



Gambar 2.1 Tatanan tektonik Indonesia Bagian Timur (Modifikasi Hall, 1991).

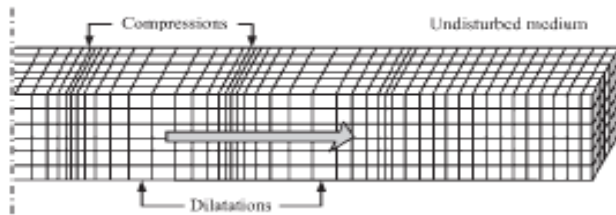
Dari Gambar 2.1 wilayah Maluku terutama pada daerah penelitian yaitu Maluku Selatan terdapat beberapa sistem sesar yang mengelilingi wilayah Maluku, beberapa diantaranya adalah Halmahera thrust, patahan Maluku-Sorong, patahan Sorong, patahan Buru, patahan Sula-Sorong yang memanjang ke arah timur, serta di bagian utara Seram terdapat zona patahan Laut Seram dan patahan Misool-Sorong (Hall, 1991).

2.3 Gelombang P dan S

Gelombang merupakan fenomena alam, di mana terjadi

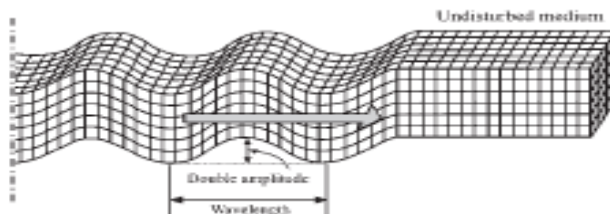
perambatan atau energi dari suatu sumber ke titik-titik lain. Gelombang seismik adalah gelombang-gelombang yang merambat baik di dalam maupun di permukaan bumi yang berasal dari sumber seismik seperti sumber gempa, patahan, dsb. Gelombang seismik termasuk gelombang mekanik, di mana membutuhkan medium dalam perambatannya dan partikel dari medium tersebut berosilasi ketika gelombang melewatinya. Gelombang ini akan tercatat oleh seismometer sebagai seismogram yang merepresentasikan osilasi partikel di titik stasiun seismik tersebut. Gelombang merambatkan energi dari sumber ke seluruh bagian bumi dan membawa informasi baik tentang sumber seismik maupun medium yang dilewatinya (Afnimar, 2009).

Gelombang seismik dibagi menjadi dua, gelombang badan dan gelombang permukaan. Berdasarkan gerak partikel dan arah penjalarannya, gelombang badan dibedakan menjadi gelombang P dan gelombang S. Gelombang Primer (P) atau gelombang kompresi/longitudinal disebut gelombang longitudinal karena arah gerak partikelnya bolak-balik dengan arah rambat gelombangnya. Gelombang P mempunyai kecepatan perambatan paling besar dibandingkan dengan gelombang seismik yang lainnya. Gelombang P dapat merambat pada medium padat, maupun fluida. Karena mempunyai kecepatan paling tinggi dibandingkan dengan gelombang yang lain, maka gelombang ini mempunyai waktu tiba yang paling cepat dibandingkan dengan gelombang seismik yang lain. Maka jika dianalisa pada fase penuh gelombang seismik pada stasiun perekam, *first break* akan merepresentasikan gelombang P. berikut adalah mekanisme penjalaran gelombang Primer (Elnashai, 2008).



Gambar 2.2 Mekanisme penjaran gelombang badan Primer (Elnashai, 2008).

Gelombang badan yang lain adalah gelombang S. Gelombang S disebut juga gelombang geser atau gelombang transversal. Gelombang ini memiliki kecepatan rambat lebih lambat daripada gelombang P, sehingga waktu tibanya juga lebih lama dibandingkan dengan gelombang P. Gelombang S datang setelah gelombang P. Gerakan partikel gelombang S adalah tegak lurus dengan arah rambatnya. Gelombang S tidak dapat merambat pada fluida. Berikut adalah mekanisme penjaran gelombang S (Elnashai, 2008).



Gambar 2.3 Mekanisme penjaran gelombang badan Sekunder (Elnashai, 2008).

Arah penjaran gelombang S terbagi menjadi dua, vertical disebut SV dan horizontal disebut SH. Gelombang P menimbulkan potensial kerusakan yang sangat sedikit, namun gelombang S baik SV maupun SH akan memberikan dampak kerusakan yang besar.

2.4 Persamaan Gelombang P dan S

Diketahui bahwa gelombang merambat dengan kecepatan yang berbeda-beda bergantung pada sifat elastis pada suatu material. Solusi persamaan perambatan gelombang mempunyai konsep yang mirip dengan perambatan getaran pada senar. Pertama ditunjukkan bahwa gelombang terjadi pada senar yang *uniform*, dan dianggap bagaimana gelombang merambat antara senar dengan sifat yang berbeda (Stein, 2003).

Diasumsikan bahwa dalam medium isotrop , dimana sifat elastis materialnya sama. Ketika, gelombang merambat menjauh dari sumber, relasi antara tegangan dan *displacement* diberikan oleh persamaan gerak dalam material homogen, $F = ma$ menjadi,

$$\sigma_{ij,j}(x, t) = \rho \frac{\partial^2 u_i(x,t)}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

Kemudian, Persamaan (2.1) diselesaikan dalam koordinat kartesian (x,y,z) menjadi,

$$\frac{\partial \sigma_{xx}(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}(x,t)}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}(x,t)}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_x(x,t)}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

Untuk mendapatkan persamaan dari *displacement*, digunakan persamaan Lamé dan hukum untuk medium elastis isotropi

$$\sigma_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu e_{ij} \quad (2.3)$$

Dengan λ adalah konstanta Lamé, dan μ adalah rigiditas (kekerasan) suatu medium, dapat ditulis (Thorne dan Wallace, 1995)

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \lambda \theta + 2\mu e_{xx} = \lambda \theta + 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \sigma_{xy} &= 2\mu e_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \\ \sigma_{xz} &= 2\mu e_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dan diambil derivative dari komponen tegangan,

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} &= \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} + 2\mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} &= \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial x} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} &= \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z \partial x} \right)\end{aligned}\quad (2.5)$$

Menggunakan fakta bahwa untuk material homogen konstanta elastisitas tidak bervariasi terhadap posisi, kemudian mensubstitusi Persamaan (2.5) ke persamaan gerak dan menggunakan definisi dari dilatasi, didapatkan (Stein, 2003)

$$\theta = \nabla \cdot u = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (2.6)$$

Dan bentuk Laplaciannya

$$\nabla^2(u_x) = \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \quad (2.7)$$

Menghasilkan

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mu \nabla^2(u_x) = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Untuk komponen x dari Persamaan (2.1) dengan cara yang sama didapatkan untuk komponen y dan z dari *displacement*. Kemudian ketiga persamaan bisa digabungkan, menggunakan vektor Laplacian dari *displacement*, didapatkan,

$$\nabla^2 u = (\nabla^2 u_x, \nabla^2 u_y, \nabla^2 u_z) \quad (2.9)$$

Dirubah kedalam persamaan vektor satuan

$$(\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot u(x, t)) + \mu \nabla^2 u(x, t) = \rho \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.10)$$

Persamaan (2.10) merupakan persamaan gerakan untuk medium elastic isotropi dalam *displacement*, namun untuk mendapatkan solusi dalam medium yang tidak isotropi, maka Persamaan (2.10) dapat ditulis kembali dengan menggunakan identitas vektor,

$$\nabla^2 u = \nabla(\nabla \cdot u) - \nabla \times (\nabla \times u) \quad (2.11)$$

Dan didapatkan

$$(\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot u(x, t)) - \mu\nabla \times (\nabla \times u(x, t)) = \rho \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

Setelah menyelesaikan Persamaan (2.12), hubungan persamaan *displacement* dibagi menjadi dua fungsi, ψ dan Y yang mana diketahui sebagai potensial (Stein, 2003),

$$u(x, t) = \nabla\psi(x, t) + \nabla \times Y(x, t) \quad (2.13)$$

Dalam Persamaan (2.13) *displacement* dapat dipecah menjadi potensial skalar yang mengacu pada gelombang P dan memenuhi persamaan gelombang scalar sebagai berikut,

$$\nabla^2\psi(x, t) = \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2\psi(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.14)$$

Dan vektor potensial yang mengacu pada gelombang S yang memenuhi persamaan vektor gelombang,

$$\nabla^2 Y(x, t) = \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 Y(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

Untuk mengetahui *displacement* yang disebabkan oleh dua tipe gelombang (P dan S), asumsikan gelombang merambat pada bidang dalam arah z. Persamaan (2.14) menjadi

$$\psi(z, t) = A \exp(i(\omega t - kz)) \quad (2.16)$$

Maka hasil dari *displacement* adalah gradiennya,

$$u(z, t) = \nabla\psi(z, t) = (0, 0, -ik) A \exp(i(\omega t - kz)) \quad (2.17)$$

Dengan komponen tidak nol hanya pada perambatan dalam arah z. Dan dilatasi yang sesuai adalah komponen tidak nol,

$$\nabla \cdot u(z, t) = -k^2 A \exp(i(\omega t - kz)) \quad (2.18)$$

Dengan terjadinya perubahan volume, sebagai rambatan gelombang, *displacement* dalam arah rambatan menyebabkan material terjadi kompresi dan regangan (*expanded*), karena gelombang dihasilkan

dari potensial scalar, maka disebut sebagai gelombang kompresi (Stein, 2003).

Sedangkan untuk gelombang S atau gelombang geser, dideskripsikan oleh potensial vektor

$$Y(z, t) = (A_x, A_y, A_z) \exp(i(\omega t - kz)) \quad (2.19)$$

Displacement diberikan oleh fungsi curl

$$u(z, t) = \nabla \times Y(z, t) = (ikA_y, -ikA_x, 0) \exp(i(\omega t - kz)) \quad (2.20)$$

Yang mana komponen sepanjang rambatan dalam arah z adalah nol. Karena itu *displacement* hanya terkait dengan rambatan gelombang geser yang tegak lurus dengan arah rambatan gelombangnya. Gelombang S tidak menyebabkan perubahan volume, karena dilatasi $\nabla \cdot u(z, t) = 0$ (Stein, 2003).

Kecepatan untuk gelombang P, dilambangkan oleh α atau v_p

$$\alpha = [(\lambda + 2\mu)/\rho]^{1/2} = [(K + 4\mu/3)/\rho]^{1/2} \quad (2.21)$$

Dan untuk kecepatan gelombang S, dilambangkan dengan β atau v_s

$$\beta = (\mu/\rho)^{1/2} \quad (2.22)$$

kecepatan gelombang seismik bergantung dari perbedaan konstanta elastis dari material. Karena *rigidity* μ dan modulus *bulk* K adalah positif, maka gelombang P merambat lebih cepat dari gelombang S. karena gelombang pertama yang sampai dalam gempa bumi selalu gelombang kompresional. Sehingga, tata nama untuk P karena mempunyai waktu tiba paling cepat gelombang “primer” dan gelombang S tiba setelah gelombang P sehingga disebut gelombang “sekunder” (Thorne dan Wallace, 1995).

2.5 Fault

Ketika dua massa tanah bergerak antara satu dengan yang lainnya, energy regangan elastic terjadi karena proses tektonik. Patahan blok melawan keseimbangan batuan dan sebuah gerakan tanah gempa bumi terjadi. Proses ini berdasar pada prinsip *elastic rebound*. Hasil dari patahan di dalam kerak bumi dinamakan *fault*. Karakteristik dari gerakan tanah gempa bumi dipengaruhi oleh mekanisme *slip* dari patahan aktif. Patahan aktif bisa

diklasifikasikan pada basis dari geometri dan arah dari *slip* relative. Parameter yang digunakan untuk mendeskripsikan gerakan patahan adalah sebagai berikut (Elnashai, 2008):

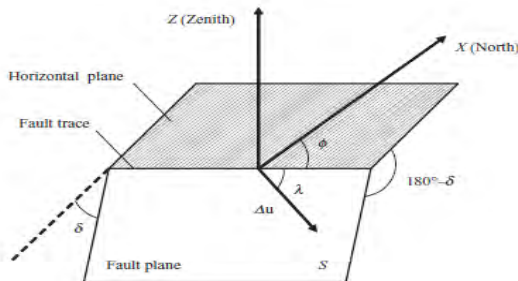
a. *Azimuth* (ϕ): sudut yang terbentuk akibat patahan, misalnya perpotongan antara bidang patahan dengan bidang, dengan arah ke utara. Sudut *azimuth* antara 0° sampai 360° . Diukur dari bidang patahan pada bagian sisi tangan kanan.

b. *Dip* (δ): sudut antara bidang patahan dengan bidang horizontal. Sudut *dip* antara 0° sampai 90° .

c. *Slip or rake* (λ): sudut antara arah dari *displacement* dan arah horizontal, sudut *slip* ini antara -180° sampai 180° , diukur pada bidang patahan.

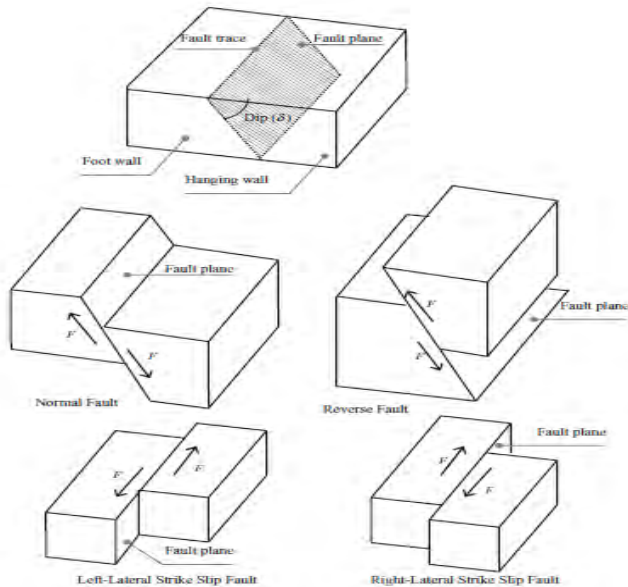
d. *Relative Displacement* (Δu): jarak yang ditempuh oleh titik pada bagian dari bidang patahan, jika Δu berubah sepanjang bidang patahan, maka nilai rata-ratanya yang dipakai.

e. *Area* (S): area permukaan dari region dengan tekanan tinggi dalam bidang patahan.



Gambar 2.4 Parameter untuk mendeskripsikan gerakan patahan (Elnashai, 2008).

Orientas dari gerakan patahan didefinisikan oleh tiga sudut, dan bagian diberikan oleh area S dan *slip* patahan diberikan oleh *displacement* relative Δu (Gambar 2.5). Beberapa mekanisme patahan didasari dengan bagaimana lempeng bergerak dengan lempeng yang lainnya. Bentuk mekanisme gempa yang paling umum digambarkan pada gambar 2.6 di bawah ini (Elnashai, 2008):



Gambar 2.5 Prinsip mekanisme patahan (Elnashai, 2008).

a. *Dip-slip faults*: satu blok bergerak vertical mengenai blok yang lain. Jika blok utama yaitu bidang patahan “footwall” bergerak relative naik terhadap blok lainnya “hanging wall”, maka patahan ini disebut *normal fault*. Jika blok bergerak sebaliknya, dimana “hanging wall” bergerak relative naik terhadap “footwall” maka patahan ini disebut *reversed fault*.

b. *Strike-slip faults*: jika satu blok bergerak mendatar terhadap blok yang lainnya. *Strike-slip* dapat bergerak ke kanan ataupun ke kiri, bergantung pada arah relative gerakan dari blok terhadap pengamat. Patahan ini adalah tipikal dari zona *transform*.

c. *Oblique-slip*: merupakan gabungan dari *strike-slip* dan *dip-slip*. *Oblique-slip* bisa berupa *normal* atau *reversed faults*, dan bisa bergerak ke kanan ataupun ke kiri. Semua mekanisme di atas bisa diidentifikasi menggunakan parameter-parameter gerakan patahan (Gambar 2.5) (Elnashai, 2008).

2.6 Inversi Perhitungan Hiposenter

William Menke (1984) mendefinisikan teori inversi sebagai suatu metode matematika dan statistika untuk mendapatkan parameter fisika berdasarkan observasi terhadap sistem tersebut. Parameter fisika yang dimaksud adalah fenomena yang ditinjau. Data observasi adalah hasil observasi pada suatu sistem, dan parameter model adalah informasi yang ingin diperoleh dari sebuah sistem. Jika data (d) dan parameter model (m) dan masing-masing dibentuk dalam sebuah vektor berikut (Menke, 2012):

$$d = [d_1, d_2, d_3, \dots, d_n]^T \quad (2.23)$$

$$m = [m_1, m_2, m_3, \dots, m_m]^T \quad (2.24)$$

Untuk kasus dimana fungsi yang menghubungkan data dengan parameter model adalah sistem linear, maka persamaan untuk menghubungkan data (d) dan parameter model (m) dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$d = Gm \quad (2.25)$$

dengan G adalah matriks Kernel ($N \times M$) yang berisi turunan kedua untuk parameter model. Metode inversi di atas dapat dilakukan untuk memperoleh solusi parameter model dari data observasi dan parameter model awal. Namun dalam kenyataan, data observasi selalu mempunyai error yang relative, sehingga parameter model hampir kebanyakan tidak *fit* dengan data observasi.

Metode *least-square* dapat didekati dengan operasi matriks. Dalam permasalahan geofisika, kebanyakan didekati dengan metode ini, $d = Gm$, dan untuk mendapatkan nilai m jika dioperasikan dalam operasi matriks maka didapatkan nilai m adalah (Menke, 2012):

$$m = G^{-1} d \quad (2.26)$$

Karena data selalu mempunyai noise atau error, sehingga persamaan (2.25) menjadi,

$$d = Gm + e_i \quad (2.27)$$

Maka untuk nilai e_i dapat diperoleh dari,

$$e_i = d - Gm \quad (2.28)$$

Dan salah satu cara untuk mendapatkan solusi yang unik adalah dengan meminimalkan jumlah kuadrat dari residual e_i (Grandis, 2009)

$$E = e^T e = (d - Gm)^T (d - Gm) \quad (2.29)$$

Untuk mendapatkan nilai minimal untuk E, maka diturunkan terhadap m, dan didapatkan (Grandis, 2009)

$$m = (G^T G)^{-1} G^T d \quad (2.30)$$

Untuk kasus posisi letak hiposenter gempa bumi, maka lokasi gempa dianggap sebagai lokasi dengan material yang homogen, sehingga gelombang yang merambat di dalamnya dianggap mempunyai kecepatan yang sama. Koordinat dari lokasi hiposenter yang sebenarnya adalah (x,y,z,t) dan koordinat stasiun perekam gempa bumi adalah (x_i,y_i,z_i,t_i) . Untuk t adalah waktu terjadi gempa (*time origin*) dan t_i adalah waktu stasiun pertama kali merekam gempa bumi. Sehingga dapat dituliskan sebagai berikut (Yudiar, 2013)

$$t_i = \frac{\sqrt{(x_i-x)^2 + (y_i-y)^2 + (z_i-z)^2}}{v} \quad (2.31)$$

Persamaan di atas menjelaskan bahwa t_i adalah elemen vektor dari data d , dan x,y,z,t adalah elemen vektor model m yang akan dicari nilainya. Elemen data individual d_i berhubungan dengan vektor model di sisi kanan, sehingga dapat ditulis

$$F(x,y,z,t) = d \quad (2.32)$$

Persamaan untuk d adalah non linear, maka dapat dilinearkan dengan metode *least-square* dengan langkah pertama adalah membuat tebakan awal m^0 dalam fungsi iterasi

$$m_j^1 = m_j^0 + \delta m_j^0 \quad (2.33)$$

dengan δm_j^0 adalah variasi perubahan parameter model ke j yang akan iterasi hingga mencapai pencarian solusi model terbaik. Misalkan untuk hiposenter ditentukan sebagai berikut

$$\begin{aligned}
\delta x_0 &= (x_1 - x_0) \\
\delta y_0 &= (y_1 - y_0) \\
\delta z_0 &= (z_1 - z_0) \\
\delta t_0 &= (t_1 - t_0)
\end{aligned} \tag{2.34}$$

untuk subskrip berhubungan dengan iterasi. Hubungan perubahan dari vektor data dapat dijelaskan dengan mengekspansi persamaan (2.31) menjadi deret Taylor

$$d_i - F_i^0(x_0, y_0, z_0, t_0) = \frac{dF}{dx_0} \delta x_0 + \frac{dF}{dy_0} \delta y_0 + \frac{dF}{dz_0} \delta z_0 \tag{2.35}$$

Persamaan (2.34) menunjukkan antara hasil observasi dengan data prediksi berhubungan linear. Nilai derivative didapatkan dari tebakan awal m_j^0 dengan mensubstitusi persamaan (2.33) ke (2.35)

$$\delta d_i = \frac{\delta d_i}{\delta m_j} \delta m_j \tag{2.36}$$

Atau dapat dinyatakan sebagai bentuk least-square

$$\Delta d = J \Delta m \tag{2.37}$$

dengan J adalah matriks Jacobi yang dievaluasi pada nilai m (parameter model) tertentu. Maka persamaan akan sama dengan hubungan linear *least-square* dengan data (d) dan parameter model (m). Dalam hal ini matriks J menggantikan matriks G, dan solusi inversi untuk mencari solusi estimasi dapat dinyatakan sebagai berikut (Yudiar, 2013)

$$\Delta m = [J^T J]^{-1} J^T d \tag{2.38}$$

Persamaan (2.37) menyatakan perturbasi yang dibutuhkan terhadap model awal agar didapatkan model yang lebih baik. Proses perturbasi model dilakukan secara iterative dengan menggunakan Persamaan (2.38) sampai diperoleh konvergensi untuk mendapatkan solusi yang optimum

$$M_{n+1} = m_n + [J_n^T J_n]^{-1} J_n^T \Delta d_n \tag{2.39}$$

Perhitungan hiposenter merupakan permasalahan inversi nonlinear. Persamaan (2.39) merupakan pencarian model optimum perturbasi secara iterative dari suatu model awal m_0 , dengan demikian pada iterasi ke-(n+1) perturbasi dilakukan terhadap model hasil iterasi sebelumnya (Yudiar, 2013).

2.7 Metode *Double Difference*

Metode *double difference* (Waldhauser & Ellsworth, 2000) merupakan salah satu teknik relokasi gempa bumi. Teknik ini menggunakan data katalog gempa serta data koreksi silang, namun bisa digunakan salah satu atau keduanya. Metode *double difference* (DD) didasari pada asumsi bahwa jika terdapat dua pusat gempa (gempa berpasangan) dengan jarak yang lebih kecil dibandingkan dengan jarak antara dua pusat gempa ke stasiun perekam, maka *raypath* dan *waveform* kedua gempa ini bisa dianggap sama. Dengan asumsi tersebut, maka selisih waktu tempuh antara kedua gempa yang terekam pada stasiun yang sama dianggap sebagai fungsi jarak antar kedua pusat gempa, sehingga dapat meminimalkan kesalahan model kecepatan tanpa menggunakan koreksi stasiun (Waldhauser & Ellsworth, 2000).

$$dr_{ek}^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (2.40)$$

Dengan i dan j menunjukkan indeks dua hiposenter yang berdekatan, dan k adalah indeks stasiun perekam untuk dua hiposenter yang berdekatan. Persamaan (2.40) dapat dilinearisasikan dengan deret Taylor orde pertama sebagai berikut,

$$dr_k^{ij} = \frac{\partial \tau_k^i}{\partial x} dx^i + \frac{\partial \tau_k^i}{\partial y} dy^i + \frac{\partial \tau_k^i}{\partial z} dz^i + d\tau^i - \frac{\partial \tau_k^j}{\partial x} dx^j - \frac{\partial \tau_k^j}{\partial y} dy^j - \frac{\partial \tau_k^j}{\partial z} dz^j - d\tau^j \quad (2.41)$$

Dengan x, y, z menunjukkan posisi hiposenter dalam koordinat kartesian, dan τ menunjukkan waktu, dan indeks i, j untuk dua hiposenter yang berdekatan, dan untuk indeks k adalah stasiun pengamat untuk dua hiposenter yang berdekatan. Jika Persamaan

(2.41) dibentuk dalam bentuk matriks, maka penyusunan matriksnya adalah sebagai berikut,

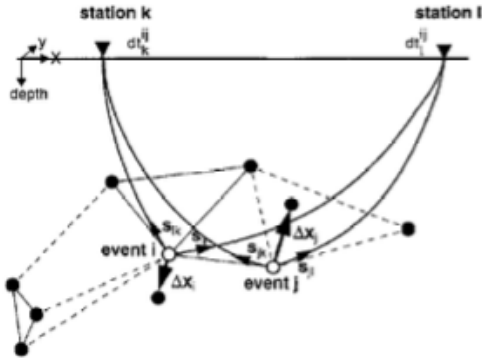
$$\begin{aligned}
 [G] = & \begin{bmatrix} \frac{\partial \tau_k^1}{\partial x} & \frac{\partial \tau_k^1}{\partial y} & \frac{\partial \tau_k^1}{\partial z} & 1 & -\frac{\partial \tau_k^2}{\partial x} & -\frac{\partial \tau_k^2}{\partial y} & -\frac{\partial \tau_k^2}{\partial z} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\partial \tau_k^1}{\partial x} & \frac{\partial \tau_k^1}{\partial y} & \frac{\partial \tau_k^1}{\partial z} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial \tau_k^3}{\partial x} & -\frac{\partial \tau_k^3}{\partial y} & -\frac{\partial \tau_k^3}{\partial z} & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial \tau_k^{n-1}}{\partial x} & \frac{\partial \tau_k^{n-1}}{\partial y} & \frac{\partial \tau_k^{n-1}}{\partial z} & 1 & -\frac{\partial \tau_k^n}{\partial x} & -\frac{\partial \tau_k^n}{\partial y} & -\frac{\partial \tau_k^n}{\partial z} & -1 \end{bmatrix} \\
 [m]^T = & [dx^1 \quad dy^1 \quad dz^1 \quad d\tau^1 \quad \dots \quad dx^n \quad dy^n \quad dz^n \quad d\tau^n]^T \\
 [d]^T = & [dr_k^{12} \quad dr_k^{13} \quad \dots \quad dr_k^{ij}]^T \quad (2.42)
 \end{aligned}$$

Dengan menggabungkan Persamaan (2.42) untuk semua pasangan hiposenter pada semua stasiun pengamat dalam satu *cluster* maka bentuk linier matriks DD adalah

$$WGm = Wd \quad (2.43)$$

Matriks G mengandung turunan parsial parameter hiposenter, W adalah matriks diagonal untuk pembobotan di tiap persamaan, m berisi data vektor perturbasi parameter setiap hiposenter pada satu *cluster*, dan d berisi data waktu tempuh residual untuk setiap pasangan gempa yang terekam pada satu stasiun (Aswad, 2010).

Pada umumnya, proses relokasi hiposenter sangat bergantung pada model kecepatan, jika relokasi tanpa menggunakan kecepatan yang termodelkan dan sesuai dengan daerah dimana pusat gempa berada, maka proses relokasi akan mengandung kesalahan akibat model kecepatan. Pada algoritma DD , efek terkait struktur kecepatan yang tidak termodelkan dapat dihilangkan, sehingga meningkatkan akurasi posisi hiposenter. Algoritma ini sudah diuji oleh Waldhauser dan Ellsworth (2000) menggunakan data gempa di bagian utara *Hayward fault* California (Waldhauser dan Ellsworth, 2000).



Gambar 2.6. Ilustrasi dari algoritma relokasi gempa *double difference* (Waldhauser dan Ellsworth, 2000)

Gambar 2.6 menunjukkan ilustrasi algoritma metode *DD*, dimana lingkaran hitam dan putih merupakan huposenter uji yang dihubungkan dengan gempa disekitarnya dengan menggunakan data korelasi silang (garis utuh) dan data katalog (garis putus-putus). Untuk dua gempa, i dan j , pada dua stasiun k dan l , dengan s adalah vektor *slowness*.

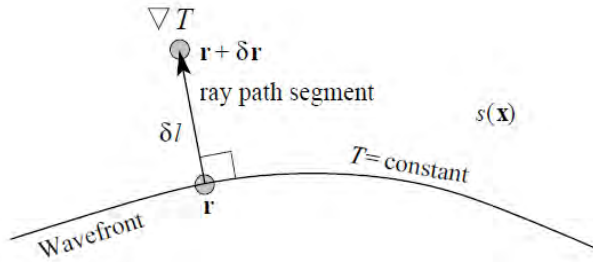
2.8 Ray Tracing

Ray tracing merupakan konsep untuk menggambarkan atau mendeskripsikan penjalaran gelombang. *Ray tracing* dapat mencerminkan suatu permukaan bawah tanah yang dilaluinya. *Ray tracing* merupakan tahapan yang paling penting dalam inversi terutama inversi geofisika yang berhubungan dengan tomografi. Jika jejak dari suatu gelombang dapat disusun dan direkonstruksi, maka dari jejak gelombang tadi dapat mencitrakan permukaan bawah tanah yang dilaluinya (Juhno dan Thurber, 1987).

Konsep *Ray tracing* ada dua, pertama sebuah objek yang dilihat oleh mata merupakan bekas pantulan dari gelombang, dan yang kedua, sebuah gelombang jika menumbuk suatu medium, maka akan terjadi pemantulan, penyerapan, dan pembisaan

gelombang oleh medium yang dilaluinya. *Ray tracing* juga bisa digunakan untuk menghitung *travel time* melalui model kecepatan.

Persamaan kinematic *ray tracing* dapat dihitung dengan mengetahui karakteristik pada lintasan orthogonal (media isotropic) sampai pada muka gelombang. Jika \mathbf{r} adalah vector posisi dari titik pada muka gelombang dan l adalah panjang lintasan yang dilalui oleh titik ini disebut evolusi muka gelombang (Gambar 2.7).



Gambar 2.7 Ray Tracing

Dengan

$$\frac{d\mathbf{r}}{dl} = \frac{\nabla T}{s} \quad (2.44)$$

Dapat ditulis

$$s \frac{d\mathbf{r}}{dl} = \nabla T \quad (2.45)$$

dengan $d\mathbf{r}/dl$ dan $\nabla T/s$ adalah unit vector yang bersifat parallel terhadap lintasan, maka laju perubahan *travel time* sepanjang lintasan direpresentasikan sebagai slowness

$$\frac{dT}{dl} = s \quad (2.46)$$

Dan dengan mendefinisikan gradient pada tiap persamaan, maka didapatkan

$$\frac{d\nabla T}{dl} = \nabla s \quad (2.47)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.45) ke persamaan (2.47) maka didapatkan persamaan kinematic *ray tracing*

$$\frac{d}{dl} \left[s \frac{d\mathbf{r}}{dl} \right] = \nabla s \quad (2.48)$$

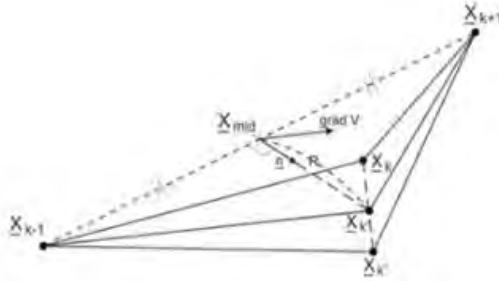
Pendekatan *ray tracing* dalam *double difference* menggunakan metode pseudo-bending dimana setiap *raypath* tebakan selalu mencapai stasiun perekam, meskipun tidak selalu sesuai dengan Hukum Snellius (Jordan, 2015). Metode pseudo-bending menggunakan prinsip Fermat, dimana gelombang merambat dengan waktu tempuh yang tercepat, atau memilih lintasan dengan kecepatan yang tercepat. Waktu tempuh (T) dapat ditulis dalam persamaan *slowness* di bawah ini

$$T = \int_{source}^{receiver} \frac{1}{v} dl \quad (2.49)$$

dengan l merupakan panjang lintasan gelombang, v adalah kecepatan gelombang, dimana l/v merupakan *slowness*. Dalam perhitungan waktu tempuh gelombang secara numerik sepanjang garis lintasan gelombang, dan mendapatkan persamaan untuk mendapatkan waktu tempuh dengan menggunakan integral *trapezoidal* didapatkan (Juhno dan Thurber, 1987)

$$T = \sum_{k=2}^n |X_k - X_{k-1}| \left(\frac{1}{v_k} + \frac{1}{v_{k-1}} \right) / 2 \quad (2.50)$$

dengan n adalah nomor dari titik definisi *ray*, X_k adalah vektor posisi dari titik ke- k , v_k adalah kecepatan gelombang pada titik ke- k . dengan melibatkan 3 titik yang berdekatan, maka Persamaan 2.50 dapat diilustrasikan dengan gambar di bawah ini



Gambar 2.8 Ilustrasi skema 3 titik perturbasi (Juhno dan Thurber, 1987).

Dari Gambar 2.8 dengan *ray segment* awal dan akhir adalah (X_{k-1}, X_k, X_{k+1}) sebelum di perturbasi, kemudian setelah diperturbasi didapatkan titik mid point yang baru yaitu $X_{k'}$. Untuk mendapatkan nilai $X_{k'}$, membutuhkan komponen normal gradient kecepatan (n')

$$\bar{n}' = (\text{grad } V) - \frac{[(\text{grad } V) \cdot (X_k - X_{k-1})](X_k - X_{k-1})}{|X_k - X_{k-1}|^2} \quad (2.51)$$

Dengan vektor unit dari komponen gradient kecepatan parallel untuk arah ray

$$\bar{n} = \frac{n'}{|n'|} \quad (2.52)$$

Nilai dari pertubasi R_c sepanjang arah dihasilkan dari penurunan persamaan (3.6) sepanjang *ray segment*, maka didapat persamaan :

$$R_c = -\frac{cV_{mid+1}}{(4cn \cdot (\text{grad } V)_{mid})} + \sqrt{\left[\frac{(cV_{mid+1})^{1/2}}{(4cn \cdot (\text{grad } V)_{mid})^2} + \frac{L^2}{2cV_{mid}} \right]} \quad (2.53)$$

dengan :

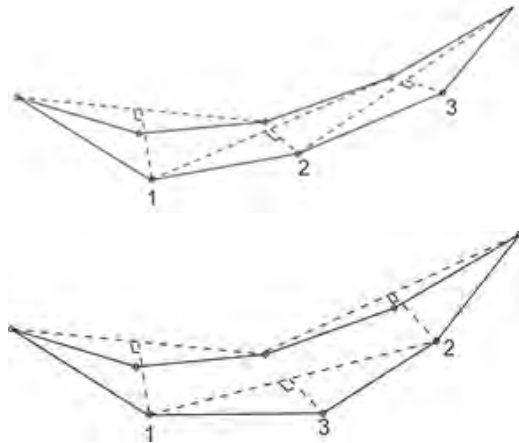
$$L = |X_k - X_{mid}| \quad (2.54)$$

$$c = \left(\frac{1}{v_k} + \frac{1}{v_{k-1}} \right) / 2 \quad (2.55)$$

dari persamaan (2.53) didapat nilai :

$$X'_k = X_{mid} + nRc \quad (2.56)$$

Junho Um dan Clifford Thurber dalam tulisannya memberikan 2 alternatif aplikasi 3 titik pertubasi untuk semua titik sepanjang ray dimana 5 titik pada gambar ini telah memperlihatkan ray tersebut.



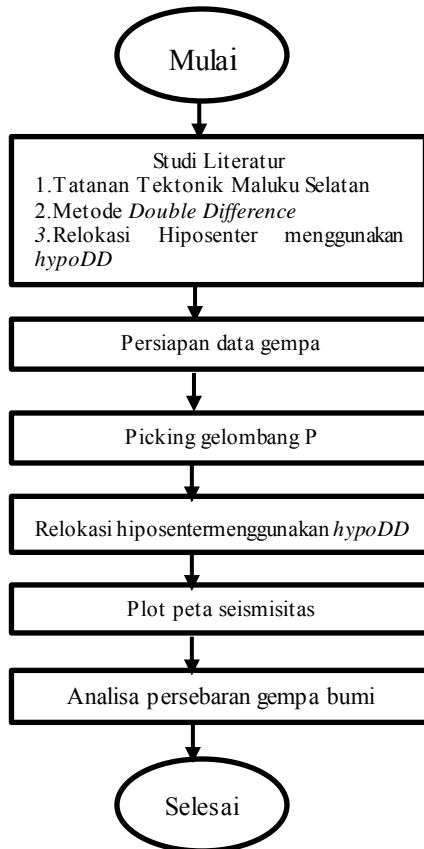
Gambar 2.9 Contoh Skema urutan pertubasi titik dari kiri ke kanan yang digunakan dalam algoritma *ray tracing* dan dari kiri dan kanan menuju ke tengah (Juhno dan Thurber, 1987).

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Secara garis besar penelitian ini dilakukan berdasarkan diagram alir di bawah ini



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Deskripsi Diagram Alir

Secara garis besar, penelitian ini mengikuti alur pada diagram alir (gambar 3.1). Deskripsi diagram alir penelitian (gambar 3.1) dapat dijelaskan secara lebih detail sebagai berikut.

1.) Studi Literatur

Tahapan ini dilakukan untuk mendalami teori-teori dan memperkuat ilmu yang berkaitan dengan penelitian ini. Tahapan ini dilakukan dengan cara membaca, mengkaji buku-buku, jurnal, paper, dan laporan-laporan lain terkait penelitian ini sebelumnya untuk dijadikan referensi dan acuan saat melakukan penelitian ini. Teori yang dipelajari antara lain tentang tatanan tektonik Maluku Selatan, metode relokasi gempa *double difference* dan relokasi hiposenter menggunakan *hypoDD*.

2.) Persiapan Data Gempa

Pada tahapan ini dilakukan persiapan data gempa yang akan diolah nantinya. Data gempa berupa data *open source* dari webdc.eu. sebelum dapat diolah, data gempa diekstrak dan dikonversi menjadi data SAC (*Seismic Analysis Code*) agar dapat diolah. Pertama menggunakan software *openssl* untuk data yang *restricted* sehingga dari data *openssl* menjadi data *.seed*, kemudian dari data *.seed* dirubah menjadi data *.SAC* menggunakan *jrdseed*.

```

Command Prompt - java -jar JrdseedVer0.10.1.jar

E:\Kuliah\TUGAS AKHIR\Olah data\data ekstrak new\bab 3>openssl des-cbc -pass pass:"dZNs{&%M"
-in 1.seed.openssl -out 1.seed -d

E:\Kuliah\TUGAS AKHIR\Olah data\data ekstrak new\bab 3>java -jar JrdseedVer0.10.1.jar
<< Java SEED Reader, Release 0.10.1 237 >>
Input File (/dev/nrst0) or 'Quit' to Exit: 1.seed
Output File (stdout) :
Volume # [(1)-N] :
Options [acCsSpRtde] : dR
Station List (ALL) :
Channel List (ALL) :
Network List (ALL) :
Loc Ids (ALL ["-" for spaces]) :
Writing GE.BNDI..BHE, 14704 samples (binary), starting 2013,044 05:19:34.2190 UT
Writing GE.BNDI..BHN, 14652 samples (binary), starting 2013,044 05:19:35.2190 UT
Writing GE.BNDI..BHZ, 14872 samples (binary), starting 2013,044 05:19:31.5690 UT
Writing GE.FAKI..BHE, 14685 samples (binary), starting 2013,044 05:19:39.3690 UT
Writing GE.FAKI..BHN, 15022 samples (binary), starting 2013,044 05:19:30.1190 UT
Writing GE.FAKI..BHZ, 14715 samples (binary), starting 2013,044 05:19:35.8690 UT
Writing GE.SANI..BHE, 14901 samples (binary), starting 2013,044 05:20:14.9690 UT
Writing GE.SANI..BHN, 14573 samples (binary), starting 2013,044 05:20:13.4190 UT
Writing GE.SANI..BHZ, 14920 samples (binary), starting 2013,044 05:20:11.6190 UT
Writing IA.NLAI..BHE, 14642 samples (binary), starting 2013,044 05:19:55.4120 UT
Writing IA.NLAI..BHN, 14745 samples (binary), starting 2013,044 05:19:50.6120 UT
Writing IA.NLAI..BHZ, 14694 samples (binary), starting 2013,044 05:20:00.8620 UT
Writing IA.OBMI..BHE, 14885 samples (binary), starting 2013,044 05:19:46.4870 UT
Writing IA.OBMI..BHN, 14762 samples (binary), starting 2013,044 05:19:47.1620 UT
Writing IA.OBMI..BHZ, 15286 samples (binary), starting 2013,044 05:19:36.8370 UT
Input File (/dev/nrst0) or 'Quit' to Exit:

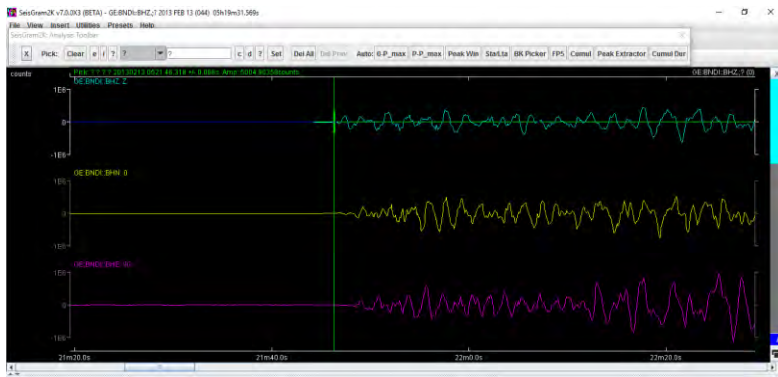
```

Gambar 3.2 Ekstrak data gempa

Gambar 3.2 menunjukkan cara untuk membuka dan mengekstrak data gempa hingga menjadi data SAC. Untuk data yang *restricted* digunakan cara pertama (pada kotak merah) agar menjadi data yang tidak terkunci dan mengubah format openssl.seed menjadi .seed dengan software openssl.jar sudah terinstall, dan selanjutnya untuk membuat data .seed menjadi data gempa .SAC digunakan cara kedua (pada kotak hijau) dengan software jrdseed.jar terletak pada satu folder dengan data gempa yang akan diekstrak.

3.) Picking Gelombang P

Tahapan ini menjelaskan tentang picking atau pencuplikan gelombang P pada data seismogram. Pada tahapan ini dilakukan menggunakan seisgram2k70, yaitu sebuah software dengan ekstensi java yang digunakan untuk membaca data seismogram dalam format SAC.



Gambar 3.3 Picking gelombang P

Gambar 3.3 menunjukkan cara picking gelombang P, dimana gelombang P merupakan fase gelombang yang pertama kali datang, karena mempunyai kecepatan paling cepat, sehingga dari Gambar 3.3 picking gelombang P terdapat pada garis hijau vertikal. Karena data yang digunakan merupakan data *travel time*, maka dari picking gelombang akan didapatkan nilai *arrival time*, dan *travel time* didapatkan dari selisih antara *arrival time* dan *origin time*.

4.) Relokasi Hiposenter Menggunakan *hypoDD*

Pada tahapan ini akan dijelaskan proses relokasi gempa bumi menggunakan program *hypoDD* yang berbasis pada metode *double difference*. Pada proses relokasi menggunakan *hypoDD* terbagi atas dua tahap proses, yang pertama tahap untuk menghubungkan gempa yang satu dengan gempa disekitarnya menggunakan program *ph2dt* dan untuk proses kedua digunakan program *hypoDD* untuk menghubungkan gempa satu dengan yang lainnya menjadi sebuah *cluster* dan melakukan koreksi waktu tiba dan stasiun untuk mendapatkan hasil relokasi gempa bumi.

a. *ph2dt*

Program *ph2dt* digunakan untuk menghubungkan gempa satu dengan gempa di sekitarnya agar membentuk beberapa pasangan gempa yang nantinya akan mejadi *cluster* yang akan direlokasi. Pasangan gempa ini merupakan dua gempa atau lebih yang mempunyai jarak yang berdekatan, dan direkam oleh stasiun yang sama. Dimana jarak antar gempa lebih dekat dibandingkan dengan jarak gempa ke stasiun.

Pada program *ph2dt* ini menggunakan beberapa parameter yang digunakan untuk menentukan pasangan-pasangan gempa yang akan dipasangkan, diantaranya adalah MINWGHT, MAXDIST, MAXSEP, MAXNGH, MINLINK, MINOBS dan MAXOBS. Untuk jarak maksimal yang masuk dalam lingkup pasangan gempa dan stasiun berada pada parameter MAXDIST. Untuk menentukan jarak maksimal antara pasangan gempa yang dapat dipasangkan dengan gempa yang lain adalah MAXSEP. Semakin besar MAXSEP akan semakin banyak gempa yang berpasangan antara satu dengan yang lainnya. MAXNGH adalah parameter yang digunakan untuk membatasi seberapa banyak pasangan gempa yang diperbolehkan menjadi dalam satu *cluster*. MINLINK digunakan untuk menentukan fase minimal pada setiap gempa yang saling berkaitan. MINLINK secara spesifik merepresentasikan jumlah minimum fase untuk pasangan fase gempa pada satu stasiun yang sama, jika jumlah minimum fase tidak terpenuhi maka gempa bumi yang berkaitan dan yang ada disekitarnya akan dipertimbangkan untuk tetap dilakukan relokasi namun diidentifikasi sebagai pasangan gempa bumi yang lemah. Penentuan banyak tidaknya pasangan gempa sangat bergantung pada parameter MAXSEP, MAXNGH dan MINLINK. Parameter lain yaitu MINWGHT adalah pembobotan minimal yang diizinkan pada proses *ph2dt*. Pasangan gempa yang berpasangan dengan

pasangan gempa-gempa yang lain akan diurutkan dari yang terdekat hingga yang terjauh, dan jumlah minimal dan maksimal dari pasangan gempa yang berhubungan dapat ditentukan pada parameter MINOBS dan MAXOBS. Felix Waldhauser dalam jurnalnya (Waldhauser, 2001) memberikan asumsi untuk jumlah data gempa yang sangat banyak, dihimbau untuk mengatur parameter $\text{MAXNGH} = \text{MINLINK} = \text{MINOBS} = 8$ dan $\text{MAXOBS} = 50$. Dan untuk data gempa yang sedikit (sekitar 100) dihimbau untuk mengatur parameter $\text{MINOBS} = 1$, $\text{MAXOBS} =$ sejumlah stasiun yang digunakan, dan MAXNGH sebanyak even gempa yang akan diteliti. Outputan dari program ini berupa *dt.ct*, *event.dat*, *event.sel*, *ph2dt.log*. Untuk file *dt.ct* berisi informasi tentang waktu tempuh untuk pasangan gempa bumi. Untuk semua even akan tercatat pada *event.dat*, untuk informasi even yang telah dipilih yang dijadikan pasangan gempa terdapat pada file *event.sel*, dan untuk *ph2dt.log* menunjukkan hasil pengolahan menggunakan program *ph2dt* beserta parameter yang dipakai. Data output pada *ph2dt* yang akan digunakan untuk input pada *hypoDD* adalah *event.sel* dan *dt.ct*. Kotak biru (Gambar 3.4) menunjukkan perintah untuk menjalankan program *ph2dt* pada jendela *redhat-cygwin*.

```

~/HYPODD/src/ph2dt
ryandi@REY ~
$ cd HYPODD
ryandi@REY ~/HYPODD
$ cd src
ryandi@REY ~/HYPODD/src
$ cd ph2dt
ryandi@REY ~/HYPODD/src/ph2dt
$ ./ph2dt ph2dt.inp
starting ph2dt (v1.3 - 08/2010) ...

reading data ...
> stations = 8
> events total = 99
> events selected = 99
> phases = 622
forming dtimes...
> P-phase pairs total = 4120
> S-phase pairs total = 0
> outliers = 536 ( 13 %)
> phases at stations not in station list = 0
> phases at distances larger than MAXDIST = 0
> P-phase pairs selected = 3984 ( 86 %)
> weakly linked events = 99 ( 100 %)
> linked event pairs = 764
> average links per pair = 4
> average offset (km) betw. linked events = 45.0198212
> average offset (km) betw. strongly linked events = 45.0198212
> maximum offset (km) betw. strongly linked events = 98.9993286

Done.

Output files: dt.ct; event.dat; event.sel; ph2dt.log
ph2dt parameters were:
(ctweight,maxdist,maxcng,minlnk,minobs,maxobs)
0.0000000 800.000000 99.0000000 99 1
1 8

```

Gambar 3.4 *Running ph2dt*

b. *hypoDD*

Setelah melakukan pengolahan data menggunakan *ph2dt* untuk menentukan pasangan-pasangan gempa bumi, selanjutnya pasangan-pasangan gempa bumi akan direlokasi menggunakan program *hypoDD*. Pasangan-pasangan gempa bumi ini akan dibentuk menjadi sebuah *cluster*. *Cluster* dapat terdiri dari dua buah gempa (1 pasangan gempa) atau beberapa gempa bumi yang sesuai dengan parameter pada *ph2dt*. Pada *hypoDD* sendiri terdapat penentuan parameter didalamnya. Dalam pengolahan pada *hypoDD* ini, data input bias berupa data katalog bias berupa data *cross-correlation* atau bias berupa kedua data tersebut. Data katalog merupakan data asli dari layanan penyedia data gempa, dan data *cross-correlation* merupakan data yang telah dilakukan korelasi silang sebelumnya. Penentuan data yang digunakan dilambangkan dengan CC untuk data *cross-correlation* dan CT untuk data katalog.

Terdapat beberapa parameter yang digunakan untuk membatasi proses relokasi agar mendapatkan solusi yang tidak terlalu banyak, diantaranya penentuan waktu tiba fase gelombang yang digunakan pada data katalog maupun data korelasi silang yaitu gelombang P, S atau keduanya. Dalam tahap *hypoDD* ini juga terdapat parameter DIST yang merupakan jarak maksimal yang diijinkan untuk gempa dan stasiun perekam, jadi pada *ph2dt* ada MAXDIST dan pada *hypoDD* ada DIST yang sama-sama untuk menentukan jarak maksimal yang diijinkan. Proses pembuatan *cluster* dipresentasikan oleh parameter OBSCT, dimana mendefinisikan jumlah minimum dari korelasi data katalog. Jika nilai OBSCT 0, maka tidak akan ada *cluster* pada gempa.

Proses relokasi dilakukan secara iterasi, atau berulang-ulang, dengan semakin banyak jumlah iterasi maka akan semakin kecil nilai residual waktu tempuh tiap *cluster* gempa, maka untuk nilai residual yang terlalu kecil, maka jika jumlah iterasi semakin banyak, residual akan menjadi 0 dan hilang dalam *cluster*. Sehingga jumlah event tercluster akan semakin sedikit seiring dengan jumlah iterasi. Jumlah iterasi ditentukan sesuai dengan kebutuhan data dan ukuran *cluster*. Dalam proses relokasi selalu ada proses inversi dimana untuk mengetahui koreksi stasiun dan koreksi waktu tempuh untuk fase gelombang, dimana pada *hypoDD* terdapat dua pilihan proses inversi, yaitu SVD (*Singular Value Decomposition*) dan LSQR (*Least-Square*).

Pemilihan dilakukan sesuai kebutuhan, untuk data yang terbilang sangat sedikit bias digunakan SVD, namun tidak menutup kemungkinan untuk LSQR, karena pada proses inversi LSQR terdapat peredaman yang membuat data hasil relokasi memiliki nilai rms yang lebih kecil. Inversi LSQR juga digunakan untuk jumlah data yang besar. Peredaman dilakukan untuk kumpulan set

data yang berbeda pada tiap iterasinya. Waldhauser (2001) memberikan saran untuk nilai redaman pada proses inversi LSQR antara 40-50. Parameter selanjutnya adalah input model kecepatan 1D yang digunakan untuk tiap kedalaman, beserta V_p (kecepatan gelombang-P). dari proses relokasi *hypoDD* ini menghasilkan output data berupa file *hypoDD.loc*, yang berisi informasi inisial data gempa sebelum direlokasi. File *hypoDD.reloc* berisi informasi data gempa setelah direlokasi, serta data untuk nilai residual dan koreksi stasiun dalam file *hypoDD.res* dan *hypoDD.sta*. Kotak biru (Gambar 3.5) menunjukkan perintah yang harus diketik untuk menjalankan program *hypoDD* pada jendela *redhat-cygwin*.

```

~/HYP0DD/src/hypoDD
cyand@SRBY ~/HYP0DD/src/hypoDD
$ ./hypoDD hypoDD.inp
Sat Jul 9 22:22:47 2016

INPUT FILES:
cross dtme data:
catalog dtme data: dt.ct
events: event.sel
stations: station.dat
OUTPUT FILES:
initial locations: hypoDD.loc
relocated events: hypoDD.reloc
event pair residuals: hypoDD.res
station residuals: hypoDD.sta
source parameters: hypoDD.src
Relocate all clusters
Relocate all events
Reading data ... Sat Jul 9 22:22:47 2016
# events = 99
# stations < maxdist = 8
# catalog P dtimes = 3584
# dtimes total = 3584
# events after dtme match = 96
# stations = 8
Clustering ...
clustered events: 96
isolated events: 0
# clusters: 3
Cluster 1: 92 events
Cluster 2: 2 events
Cluster 3: 2 events

RELOCATION OF CLUSTER: 1 Sat Jul 9 22:22:47 2016
-----
Reading data ... Sat Jul 9 22:22:47 2016
# events = 92
# stations < maxdist = 8
# catalog P dtimes = 3575
# dtimes total = 3575
# events after dtme match = 92
# stations = 8
Initial trial sources = 92

IT EV CT RMSCT RMSST DX DY DZ DT OS AQ CND
  % % ms ms m m m ms m
1 100 94 811 -28.2 0 1226 1588 1522 150 0 2 15
2 1 98 91 787 -3.0 1393 1124 1470 1071 135 1449 0 15
3 98 85 614 -21.9 1393 665 179 1164 81 1449 2 16
4 2 96 81 588 -4.4 1216 615 853 2753 78 632 0 15
5 95 76 454 -22.7 927 382 499 1499 40 639 0 15
6 4 95 70 372 -18.0 652 330 349 323 25 502 0 14
7 5 95 67 308 -17.3 533 229 220 140 14 499 0 14
8 6 93 64 268 -12.9 500 165 143 140 5 499 0 13

writing out results ...

```

Gambar 3.5 Running *hypoDD*

5.) Plot Peta Seis misitas

Pada tahap ini digunakan untuk membuat peta seismisitas untuk mengetahui pergerakan lokasi gempa bumi sebelum dan

sesudah direlokasi. Pembuatan peta seismisitas ini digunakan menggunakan software GMT, yang sebelumnya harus diinstal gsvieiw dan ghostscript untuk dapat membaca script pada program GMT dan dapat menampilkan peta seismisitas yang dibuat sendiri.

6.) Analisa Persebaran Gempa Bumi

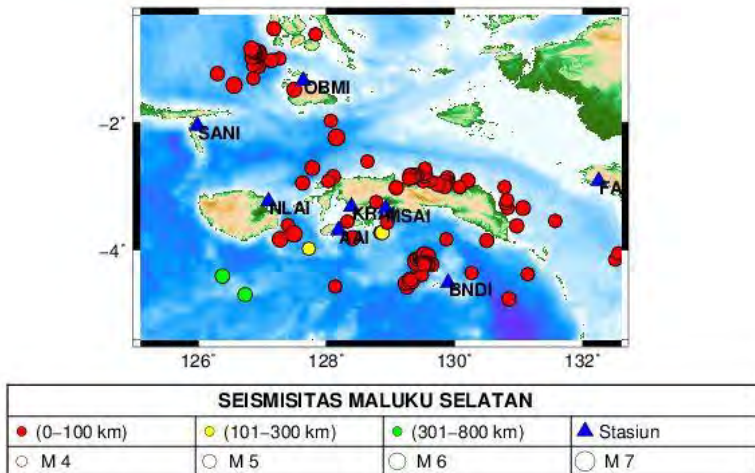
Tahapan terakhir adalah analisa persebaran gempa bumi dimana pada tahap ini dilakukan analisa untuk persebaran gempa bumi, ditinjau dari pergeseran terjauh, arah pergeseran terjauh menggunakan plot diagram kompas dengan bantuan MATLAB, kemudian arah pergeseran gempa paling banyak menggunakan plot diagram rose dengan bantuan MATLAB, serta plot kedalaman hiposenter menggunakan GMT.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Seismisitas Wilayah Maluku Selatan

Pada penelitian ini data gempa yang digunakan merupakan data open source dari webdc.eu. data gempa yang digunakan adalah data gempa di wilayah Maluku Selatan, periode 18 Januari 2011 sampai 25 Februari 2016 dengan magnitude minimal 4.8SR. Data yang digunakan sebanyak 99 event gempa bumi yang tersebar di wilayah Maluku Selatan (Gambar 4.1).

PERSEBARAN GEMPA DI MALUKU SELATAN



Gambar 4.1 Peta Persebaran Gempa Bumi dan Stasiun perekam di wilayah Maluku Selatan

Jika diamati pada Gambar 4.1, terlihat gempa yang diteliti tersebar di seluruh wilayah Maluku Selatan, hanya beberapa gempa yang terlihat berkumpul menjadi satu dan berdekatan antara satu dengan yang lainnya. Untuk gempa dangkal antara kedalaman 0-100 Km ditunjukkan dengan warna merah, untuk

gempa menengah dengan kedalaman 101-300 Km warna kuning, dan untuk gempa dengan warna hijau menunjukkan gempa dalam dengan kedalaman 301-800 Km, dan untuk kekuatan gempa (magnitudo) ditunjukkan dengan besar kecilnya lingkaran. Terlihat dari Gambar 4.1 bahwa kondisi seismisitas pada wilayah Maluku Selatan didominasi oleh gempa dangkal kedalaman 0-100 Km dengan kekuatan 4-5 SR.

4.2 Relokasi Metode *Double Difference*

Relokasi hiposenter menggunakan metode *double difference* dilakukan dengan dua tahap, pertama dengan *ph2dt*, dan yang kedua menggunakan *hypoDD*. Untuk tahap pertama menggunakan *ph2dt* diberikan parameter MAXDIST 800km, karena ketika menggunakan MAXDIST 700Km ada beberapa fase gelombang yang tidak tercakup dalam pembacaan oleh *ph2dt*, sehingga perlu ditambahkan lagi untuk MAXDIST agar semua gempa masuk dalam pembacaan *ph2dt*. Parameter kedua adalah parameter MAXSEP yang merepresentasikan jarak maksimal antara gempa bumi dengan pasangan gempa bumi yang lainnya. Untuk MAXSEP 99 hal ini dilakukan karena pola persebaran gempa pada wilayah Maluku Selatan tersebar dimana-mana, sehingga jika menggunakan MAXSEP yang kecil, maka akan ada gempa yang tidak terbaca dan tidak masuk dalam lingkup pembacaan oleh *ph2dt*, sehingga perlu diberikan MAXSEP yang tinggi agar semua gempa terbaca dan masuk dalam lingkup pembacaan oleh *ph2dt*. Dengan memberikan parameter MAXSEP 99 Km, dari 99 event gempa bumi, yang tercluster 96 event gempa, dan yang terelokasi sebanyak 90 gempa yang terbagi dalam tiga cluster, cluster pertama sebanyak 86 event gempa, cluster dua sebanyak 2 event gempa, dan cluster ketiga sebanyak 2 event gempa. Untuk parameter yang lain, mengikuti saran dari Waldhauser (2001) untuk memberikan parameter sesuai dalam petunjuk *hypoDD* untuk mencapai hasil yang maksimal, sehingga untuk parameter MAXNGH diberikan 99 dimana merupakan jumlah total event gempa yang dipakai

pada penelitian ini, MINLNK dan MINOBS diberikan nilai 1, karena agar bisa mencapai hasil yang maksimal untuk proses relokasi menggunakan *hypoDD*, MAXOBS diberi nilai 8 dimana merupakan jumlah total stasiun perekam gempa yang dipakai pada penelitian ini. Hasil dari pengolahan *ph2dt* adalah sebagai berikut

```

~ /HYPODD/src/ph2dt
Ryandi@RBY ~
$ cd HYPODD
Ryandi@RBY ~/HYPODD
$ cd src
Ryandi@RBY ~/HYPODD/src
$ cd ph2dt
Ryandi@RBY ~/HYPODD/src/ph2dt
$ ./ph2dt ph2dt.inp
starting ph2dt (v1.3 - 08/2010)...

reading data ...
> stations = 8
> events total = 99
> events selected = 99
> phases = 622
forming dtimes...
> P-phase pairs total = 4120
> S-phase pairs total = 0
> outliers = 536 ( 13 %)
> phases at stations not in station list = 0
> phases at distances larger than MAXDIST = 0
> P-phase pairs selected = 3584 ( 86 %)
> weakly linked events = 99 ( 100 %)
> linked event pairs = 764
> average links per pair = 4
> average offset (km) betw. linked events = 45.0198212
> average offset (km) betw. strongly linked events = 45.0198212
> maximum offset (km) betw. strongly linked events = 98.9993286

Done.

Output files: dt.ct; event.dat; event.sel; ph2dt.log
ph2dt parameters were:
(minwght,maxdist,maxsep,maxngh,minlnk,minobs,maxobs)
0.0000000 8 800.000000 99.0000000 99 1
1 8

```

Gambar 4.2 Hasil *running* program *ph2dt*

Pada Gambar 4.2 untuk fase gelombang S adalah nol, karena yang digunakan pada penelitian ini adalah fase gelombang P saja. Semakin tinggi MAXSEP maka fase gelombang P yang dipasangkan semakin banyak. *Outlier* menunjukkan *delay times* yang lebih besar dari maksimum *delay times* yang diberikan untuk event gempa yang berpasangan (Waldhauser, 2000). Semakin besar nilai yang diberikan pada parameter MAXSEP maka akan memperbesar *outliers*, karena untuk posisi gempa yang sangat jauh dari gempa yang lainnya, maka jika nilai

MAXSEP semakin tinggi, maka gempa tersebut akan secara paksa dipasangkan dengan gempa yang lain, sehingga akan memperbesar *delay times*. Output berupa file diferensial untuk data katalog (*dt.ct*) dan event yang masuk dalam relokasi (*event.sel*) menggunakan *hypoDD*.

Di dalam *hypoDD*, parameter yang terkandung merupakan pengklasifikasian dari data korelasi silang dan data katalog. Disini data yang digunakan hanya data katalog saja, karena merupakan data *open source* dari webdc.eu. parameter yang menentukan untuk terjadinya clustering adalah OBSCT dimana jika bernilai 0, maka tidak akan terjadi cluster. Dan jika nilainya lebih besar dari nilai MINLNK maka tidak akan terjadi clustering. Parameter lainnya yang berpengaruh adalah WDCT, parameter ini yang mengatur jarak didalam *hypoDD* dengan pembobotan jarak. Parameter ini menentukan jumlah gempa yang akan di cluster. *HypoDD* akan menghilangkan data gempa yang ada dalam satu cluster jika jarak antar gempanya lebih besar daripada nilai dalam WDCT untuk iterasi pertama. Di sisi lain, jumlah gempa yang tidak terelokasi/dihilangkan dari sistem *hypoDD* juga dipengaruhi oleh nilai residual trheshold yang tidak terpenuhi dalam parameter WRCT. Nilai residual trheshold bertambah seiring dengan iterasi, jadi untuk mengurangi eliminasi data, maka jumlah iterasi bisa dikurangi, tapi akan mempengaruhi nilai pada RMS, karena proses inversi harus melakukan peturbasi secara iteratif untuk mendapatkan solusi yang optimum dan yang terbaik (Grandis, 2009).

```

~/HYPODD/src/hypoDD
Ryandi@REBY ~/HYPODD/src
$ cd hypoDD
Ryandi@REBY ~/HYPODD/src/hypoDD
$ ./hypoDD hypoDD.inp
starting hypoDD (v1.3 - 11/2010)... Sat Jul 9 22:22:47 2016
INPUT FILES:
cross dttime data:
catalog dttime data: dt.ct
events: event.sel
stations: station.dat
OUTPUT FILES:
initial locations: hypoDD.loc
relocated events: hypoDD.reloc
event pair residuals: hypoDD.res
station residuals: hypoDD.sta
source parameters: hypoDD.src
Relocate all clusters
Relocate all events
Reading data ... Sat Jul 9 22:22:47 2016
# events = 99
# stations < maxdist = 8
# catalog P dtimes = 3584
# dtimes total = 3584
# events after dttime match = 96
# stations = 8
Clustering ...
Clustered events: 96
Isolated events: 0
# Clusters: 3
Cluster 1: 92 events
Cluster 2: 2 events
Cluster 3: 2 events
RELOCATION OF CLUSTER: 1 Sat Jul 9 22:22:47 2016
-----
Reading data ... Sat Jul 9 22:22:47 2016
# events = 92
# stations < maxdist = 8
# catalog P dtimes = 3575
# dtimes total = 3575
# events after dttime match = 92
# stations = 8
Initial trial sources = 92

```

IT	EV	CT	RMSCT	RMSST	DX	DY	DZ	DT	OS	AQ	CND
1	%	%	ms	%	m	m	m	ms	m		
1	100	94	811	-28.2	0	1226	1588	5522	150	0	2 15
2	1	98	91	787	-3.0	1393	1124	1470	3071	135	1449 0 15
3	2	98	85	614	-21.9	1393	665	873	4164	81	1449 2 16
4	2	96	81	588	-4.4	1216	615	853	2753	78	632 0 15
5	3	95	76	454	-22.7	927	382	499	1499	40	639 0 15
6	4	95	70	372	-18.0	652	330	349	323	25	502 0 14
7	5	95	67	308	-17.3	533	229	220	*****	14	***** 0 14
8	6	93	64	268	-12.9	500	165	149	140	8	499 0 13

```

writing out results ...

```

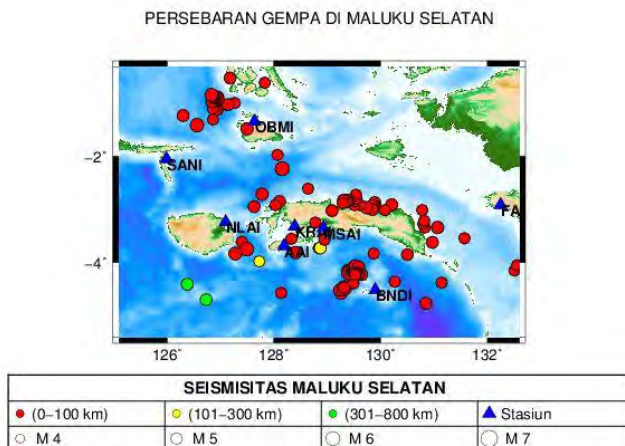
Gambar 4.3 Hasil *running* program *hypoDD*

Kolom pertama menunjukkan jumlah iterasi, dan untuk kolom kedua menunjukkan jumlah iterasi yang berhasil dilakukan, dalam hal ini berhasil tidaknya iterasi ditentukan oleh ada tidaknya *airquake* atau bisa disebut sebagai gempa di atas permukaan. Untuk melihat apakah kondisi sistem *hypoDD* baik atau tidak, dilihat dari nilai *condition number* (CND) yang mana merupakan rasio antara nilai eigen yang terbesar dan yang terkecil. Nilai CND juga dipengaruhi oleh besar kecilnya parameter *damping* yang diberikan ketika menggunakan inversi LSQR pada sistem *hypoDD*. Pada penelitian ini digunakan nilai *damping* sebesar 60, dan menghasilkan nilai CND untuk cluster

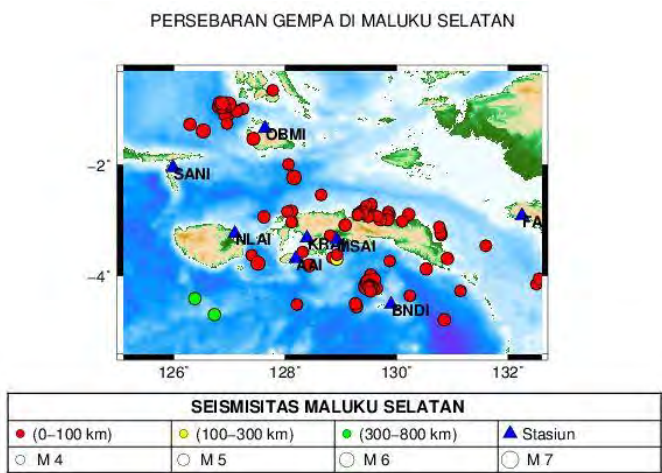
ke-1 pada iterasi terakhir yaitu 13, dan untuk cluster ke-2 dan ke-3 pada iterasi terakhir menghasilkan nilai CND 2. Waldhauser (2000) menunjukkan bahwa nilai CND yang terlalu kecil menandakan solusi dengan redaman yang terlalu tinggi. Output untuk program *hypoDD* adalah hasil relokasi (*hypoDD.reloc*), residual event yang berpasangan, residual stasiun, parameter sumber dan inisial lokasi hiposenter sebelum direlokasi (*hypoDD.loc*).

4.3 Analisa Hasil Relokasi Hiposenter

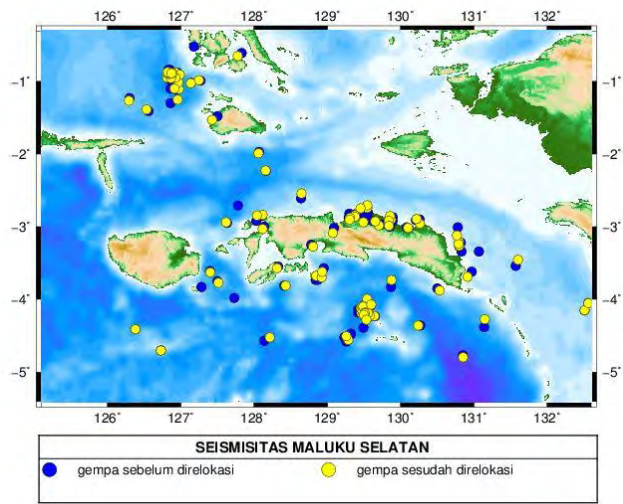
Setelah pengolahan data menggunakan program *hypoDD*, didapatkan hasil relokasi dalam file *hypoDD.reloc* yang berisi informasi tentang *latitude*, *longitude*, *depth* yang baru hasil relokasi menggunakan *hypoDD*. Kemudian hasil sebelum direlokasi, sesudah direlokasi, dan gabungan dari sebelum dan sesudah relokasi di buat peta seismisitasnya menggunakan GMT dan hasilnya sebagai berikut.



Gambar 4.4 Plot peta hiposenter sebelum direlokasi



Gambar 4.5 Plot peta hiposenter sesudah relokasi



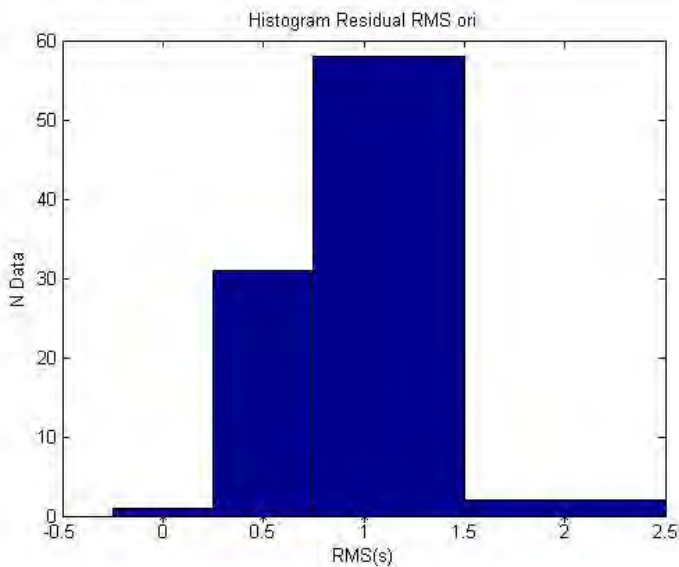
Gambar 4.6 Plot peta epicenter sebelum dan sesudah direlokasi

Hasil relokasi dapat dilihat pada Gambar 4.5, dan hasil gabungan bisa dilihat pada Gambar 4.6 dengan warna biru adalah gempa sebelum direlokasi, sedangkan warna kuning merupakan gempa sesudah direlokasi. Gambar 4.5 memperlihatkan bahwa episenter yang terelokasi memiliki kecenderungan berkumpul di suatu wilayah, dan perubahan lokasi epicenter setelah direlokasi cenderung ke arah yang tidak tentu/acak, namun untuk gempa yang berdekatan, epicenternya cenderung berkumpul pada satu titik yang saling mendekat. Terlihat pada Gambar 4.6, ada beberapa gempa yang tidak terelokasi, hal ini dikarenakan gempa terlalu jauh dengan pasangan gempa yang lain. Jika ingin memaksakan gempa untuk dapat terelokasi, maka nilai MAXSEP dan WDCT harus sangat besar, nilai MAXSEP yang tinggi akan berdampak pada nilai *outliers* dan akan membuat hasil relokasi gempa tidak berjalan, atau bisa disebut hasil epicenter gempa yang sudah direlokasi akan sama persis dengan gempa sebelum direlokasi atau tidak terjadi perubahan posisi pada epicenter gempa. Dengan begitu, maka tidak ada proses relokasi yang terjadi, maka dari itu nilai MAXSEP tidak boleh terlalu besar, serta penentuan nilai MAXSEP disesuaikan dengan persebaran gempa di daerah penelitian.

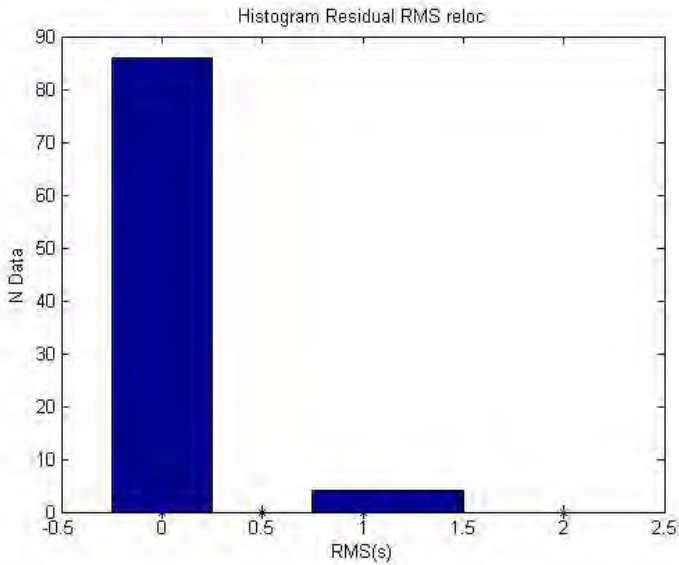
4.4 Perhitungan RMS Hasil Relokasi Hiposenter

Untuk mengetahui hasil relokasi itu akurat atau tidak, bisa ditinjau dari dua hal. Pertama dari nilai RMS pada hasil relokasi, dan yang kedua adalah dikorelasikan antara hasil relokasi dengan kondisi geologi daerah penelitian. Dari sini, maka nilai RMS sangat penting dalam menunjukkan apakah relokasi terbilang akurat atau tidak, dan untuk mengetahui apakah RMS kita akurat, maka harus ada data pembandingan berupa data sebelum direlokasi. Hasil dari relokasi menunjukkan nilai RMS pada

kolom kedua dari kanan dalam file *hypoDD.reloc.* untuk lebih mudahnya dalam menganalisa nilai RMS hasil relokasi, maka dibuat histogram nilai RMS hasil relokasi dan hasil sebelum direlokasi. Karena data gempa merupakan data *open source* dari webdc.eu, maka tidak diberikan nilai RMS data katalog gempa, sehingga untuk data pembanding digunakan nilai RMS pada iterasi pertama, dan untuk hasil relokasi digunakan nilai RMS pada iterasi kelima, dan hasilnya sebagai berikut.



Gambar 4.7 Histogram nilai RMS sebelum relokasi



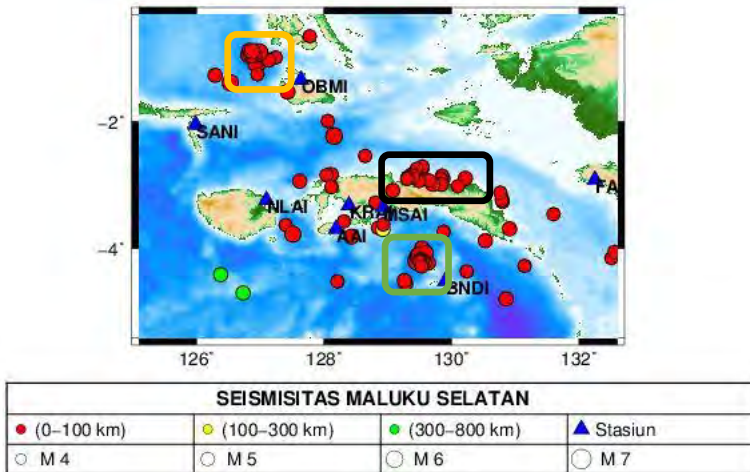
Gambar 4.8 Histogram nilai RMS sesudah relokasi

Dari perbandingan Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa nilai RMS hasil relokasi berkisar antara didominasi oleh nilai yang mendekati nol, dan hanya 2 event dengan nilai RMS diatas 1, sedangkan untuk data sebelum direlokasi (Gambar 4.7) nilai RMS didominasi dengan nilai diatas 1, dan ada nilai yang diatas 2. Semakin kecil nilai RMS yang dihasilkan, maka akan semakin berhimpit data hasil perhitungan dengan data hasil observasi, artinya parameter model yang diberikan pada hasil relokasi menggunakan metode *double difference* hampir mendekati parameter sebenarnya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa relokasi menggunakan metode *double difference* memberikan hasil relokasi yang lebih akurat, ditunjukkan dari nilai RMS hasil relokasi menggunakan metode *double difference*.

4.5 Analisis Persebaran Hiposenter

Hasil dari relokasi gempa bumi yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menganalisa bagaimana persebaran hiposenter di daerah penelitian.

PERSEBARAN GEMPA DI MALUKU SELATAN

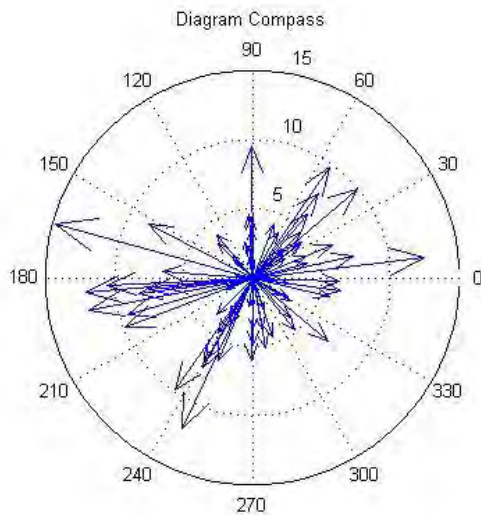


Gambar 4.9 Pola persebaran hiposenter

Pada Gambar 4.9 terlihat ada beberapa gempa yang berkumpul dalam satu titik, dimana yang diberikan dengan kotak oren, hitam, dan hijau. Zona yang banyak terjadi gempa menurut peta potensi gempa (Tim revisi peta gempa Indonesia, 2010) merupakan zona rawan gempa, dimana hiposenter dengan kotak oren (Gambar 4.9) merupakan zona *thrust* pada Laut Maluku dengan *slip-rate* sebesar 29 mm/tahun dan jenis *focal mechanism*nya adalah tipe normal-slip, sedangkan pada kotak berwarna hijau di Selatan, merupakan zona *thrust* laut Seram selatan yang bergerak ke arah utara dengan pergerakan 8.5 mm/tahun dengan *focal mechanism*

tipe normal-slip, dan untuk lingkaran berwarna hitam terlihat bahwa beberapa gempa terpusat disana, dan zona tersebut merupakan zona subduksi Laut Banda (Peta Hazard Gempa Indonesia, 2010). Sedangkan untuk gempa yang terjadi menyebar di Pulau Seram bisa diperkirakan karena efek gempa susulan (*aftershock*) akibat gempa utama dengan magnitudo yang besar. Den beberapa gempa yang terjadi di dasar lautan, bisa karena efek vulkanik di dasar laut, maupun zona subduksi lempeng Indo-Australia.

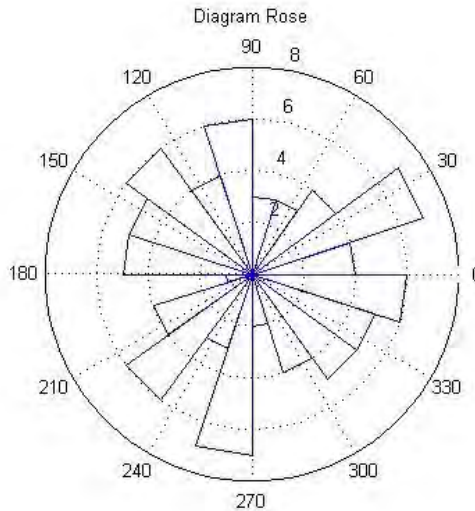
Kemudian untuk mendapatkan pergeseran posisi hiposenter hasil relokasi, dapat menggunakan diagram kompas untuk mengetahuinya.



Gambar 4.10 Diagram kompas

Dari Gambar 4.10 dapat diketahui bahwa hiposenter bergeser paling jauh sebesar 14.7830 Km dengan besar sudut 164.7650°

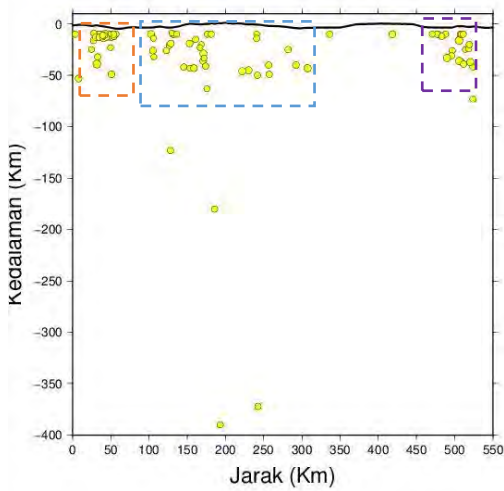
dari 0° ke arah barat daya, dimana 0° merupakan arah utara menurut kompas. Untuk memperoleh pergeseran gempa yang paling banyak terjadi bergeser kearah mana, digunakan diagram rose sebagai berikut.



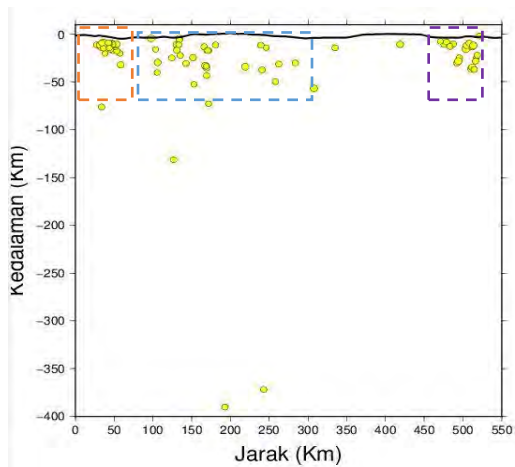
Gambar 4.11 Diagram rose

Dari Gambar 4.11 dapat dianalisa bahwa gempa tersebar secara acak, dan gempa paling banyak bergeser ke arah barat laut dan ke arah timur dengan jumlah gempa sebanyak 7 event.

Analisis persebaran selanjutnya dilakukan dengan melihat seluruh gempa yang sudah terelokasi dalam fungsi kedalaman, sehingga dapat diketahui persebaran hiposenter dalam fungsi kedalaman. Maka dibuat sebuah *sumcross* antara kedalaman (Km) dan jarak (Km) sebagai berikut,



Gambar 4.12 Analisis persebaran berdasarkan penampang vertikal dengan kondisi hiposenter sebelum direlokasi



Gambar 4.13 Analisa persebaran berdasarkan penampang vertikal dengan kondisi hiposenter sesudah direlokasi

Dari Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 terlihat bahwa distribusi hiposenter berubah, dimana pada saat sebelum direlokasi (Gambar 4.12) distribusi masih menyebar dan kedalamannya masih banyak pada kedalaman 10 Km dimana merupakan *fixed depth*, namun setelah dilakukan relokasi (Gambar 4.13) distribusi hiposenternya kedalamannya lebih menyebar, namun untuk pergeserannya lebih berkumpul. Seperti pada kotak berwarna pada Gambar 4.12 maupun Gambar 4.13 menunjukkan perubahan hiposenter pada event gempa yang sama. Pada lingkaran warna merah, hasil sebelum direlokasi banyak berkumpul pada kedalaman *fixed depth* dan persebaran hiposenternya untuk latitude dan longitudnya lebih menyebar, namun pada saat hasil relokasi (Gambar 4.13) pada kotak yang sama (merah) hasil relokasi memberikan hasil kedalaman yang lebih menyebar, antara 10-40 Km dan lokasi latitude dan longitude hiposenter lebih berkumpul pada satu titik. Untuk lingkaran ungu maupun biru, juga memberikan hasil yang sama, yaitu perubahan kedalaman yang lebih menyebar dalam arti keluar dari *fixed depth* dan memberikan pergeseran hiposenter yang lebih terkumpul pada satu titik. Maka dapat dikatakan bahwa relokasi hiposenter menggunakan metode *double difference* memberikan pergeseran gempa yang lebih berkumpul pada satu titik dan memberikan kedalaman yang tersebar (keluar dari *fixed depth*). Jika dibandingkan jumlah lingkaran kuning yang menunjukkan jumlah event gempa, maka hasil sebelum direlokasi (Gambar 4.12) lebih banyak dibandingkan dengan sesudah direlokasi (Gambar 4.13), karena metode *hypoDD* akan mengeliminasi dan tidak merelokasi gempa-gempa yang tidak memenuhi persyaratan dalam parameter yang ditentukan.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari pengolahan data, analisa data dan pembahasan yang telah dilakukan pada penelitian Tugas Akhir ini, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan diantaranya:

1. Relokasi menggunakan metode *double difference* mampu memberikan hasil relokasi yang lebih akurat, hal ini ditunjukkan dengan nilai RMS hasil relokasi yang jauh lebih baik (mendekati nol) dibandingkan dengan nilai RMS sebelum relokasi.
2. Persebaran hiposenter gempa banyak terjadi dekat patahan, dan zona subduksi lempeng, pergeseran episenter lebih terkumpul pada satu titik dan kedalaman hiposenter lebih tersebar (keluar dari *fixed depth*) didominasi antara 2-50 Km.

5.2 Saran

Untuk mendapatkan hasil penelitian yang lebih baik lagi, penulis menyarankan bahwa untuk penelitian-penelitian kedepan perlu ditambahkan jumlah event gempa dan stasiun pencatat untuk mendapatkan relokasi yang lebih baik. Dan perlu dilakukan variasi-variasi untuk parameter dalam proses relokasi menggunakan *hypoDD* agar lebih paham dampak dan fungsi dari tiap parameter, serta untuk mendapatkan hasil relokasi yang jauh lebih baik lagi.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	Data Gempa Penelitian	57
Lampiran B	Data Stasiun Perekam Pada Penelitian	63
Lampiran C	Data Hasil Relokasi Gempa	64
Lampiran D	Script MATLAB	68

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Afnimar. 2009. *Seismologi*. Institut Teknologi Bandung: Bandung.
- Arief, Mustofa Nur. 2010. *Jurnal Gempa Bumi, Tsunami, dan Mitigasinya*. Vol 7 no 1. LIPI: Kebumen.
- Aswad, Sabrianto. 2010. *Relokasi Gempa Vulkanik Kompleks Gunung Guntur Menggunakan Algoritma Double Difference*. Karya Tulis. Institut Teknologi Bandung: Bandung.
- Elnashai, S. Amr., Sarno, Di Luigi. 2008. *Fundamentals of Earthquake Engineering*. John Wiley & Sons, Ltd: USA.
- Grandis, H. 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI): Jakarta.
- Hall, Robert. 1991. *Plate Boundaru Evolution in the Halmahera Region, Indonesia*. Elsevier Science Publishers, Tectonophysics, 144, 337-352.
- Hartono, H.M.S. 1990. *Terbentuknya Busur Vulkanik Banda*. Geology Indonesia, 12(2), p.105-112.
- Irsyam, Masyhur, dkk. 2010. *Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010*. Bandung.
- Kirmanto, Djoko. 2010. *Peta Hazard Gempa Indonesia 2010*. Kementrian Pekerjaan Umum: Jakarta.
- Menke, William. 2012. *Geophysical Data Analysis Discrete Inverse Theory*. Academic Press, Elsevier Inc Oxford: Ukraina.
- Powel, D.E. 1976. *The geological evolution of the continental margin of Northwest Australia*. *Journal of Australian Petroleum Exploration Association*, 10, p.13-23.
- Shearer, M Peter. 2009. *Introduction to Seismology 2nd Edition*. Cambridge University Press: Ukraina.
- Stein, Seth., Wyssession Michael. 2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Blackwell Publishing: Ukraina.

- Setyawan, E. Jordan. 2015. *Estimasi Zona Sesar Segmen Aceh dengan Metode Relokasi Double Differecen dan Metode Local Earthquakes Tomography*. Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember: Surabaya.
- Um, Junho dan Clifford Thurber. 1987. *A Fast Algorithm for Two Point Seismic Ray Tracing*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.77, No.33, pp. 972-986.
- Wallace, C. Terry and Thorne Lay. 1995. *Modern Global Seismology*. Academic Press: San Diego.
- Waldhauser, Felix and William L. Ellsworth. 2000. *A Double Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California*. Bulletin of the Seismological Society of America, 90, 6, pp. 1353-1368.
- Waldhause, Felix. 2001. *HypoDD: A computer program to compute double-difference earthquake location*, U.S. Geol. Surv. Openfile report, 01-113, Menlo Park, California.
- Yudiar, R. Yungi. 2013. *Relokasi Hiposenter Gempa Bumi di Sumatera Selatan dengan Menggunakan Hypo71*. Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember: Surabaya.

LAMPIRAN A

Data Gempa Penelitian

Info data gempa:

Date : 18-01-2011 sampai 25-02-2016

Magnitude Minimum : 4.8

North : -2.41

West : 126.78

East : 131.35

South : -4.6

Time		Mag	Lat	Lon	Depths	Location
2/13/2013	5:21:15	5.5	-2.9	130.26	10	Seram, Indonesia
1/23/2013	8:23:00	5.2	-2.91	130.21	26	Seram, Indonesia
2/2/2011	9:26:51	4.8	-3.01	130.08	14	Seram, Indonesia
7/9/2013	16:15:39	5	-2.87	129.89	10	Seram, Indonesia
5/28/2013	10:24:07	4.9	-2.92	129.89	21	Seram, Indonesia
1/12/2013	17:33:39	5.2	-2.93	129.85	19	Seram, Indonesia
3/14/2014	3:22:34	5.1	-3	129.85	26	Seram, Indonesia
10/28/2011	23:50:55	5.3	-2.97	129.74	10	Seram, Indonesia
1/19/2014	23:30:10	4.9	-2.92	129.62	42	Seram, Indonesia
2/20/2016	1:26:36	4.8	-2.92	129.51	43	Seram, Indonesia
9/12/2014	15:41:50	5.2	-2.84	129.53	43	Seram, Indonesia
9/15/2013	9:06:42	4.9	-2.8	129.55	15	Seram, Indonesia
1/30/2012	18:25:18	4.8	-2.72	129.54	20	Seram, Indonesia

Time		Mag	Lat	Lon	Depth	Location
3/8/2012	20:36:59	4.8	-2.83	129.43	23	Seram, Indonesia
7/12/2012	15:40:16	5.4	-2.83	129.37	36	Seram, Indonesia
11/27/2012	2:59:09	5.6	-2.85	129.34	29	Seram, Indonesia
3/7/2015	0:58:33	4.9	-2.82	129.3	10	Seram, Indonesia
11/27/2012	12:38:49	4.8	-2.88	129.29	33	Seram, Indonesia
6/16/2013	8:04:26	5	-3.02	129.09	41	Seram, Indonesia
8/2/2015	23:31:36	4.8	-3.25	128.78	63	Seram, Indonesia
10/4/2015	5:08:31	4.8	-2.61	128.64	10	Ceram Sea
5/21/2014	18:14:30	5	-2.85	128.11	49	Ceram Sea
5/30/2013	14:38:23	4.9	-2.92	128.03	40	Ceram Sea
10/15/2014	18:32:22	4.9	-3	128.14	50	Seram, Indonesia
4/4/2015	8:06:22	5.3	-2.71	127.78	40	Ceram Sea
6/9/2012	8:49:28	5.1	-2.95	127.63	25	Ceram Sea
3/20/2013	5:16:56	4.9	-3.61	127.4	14	Seram, Indonesia
1/16/2016	23:22:35	5.5	-3.83	127.28	45	Seram, Indonesia
5/2/2014	8:43:36	5.8	-3.75	127.5	46	Seram, Indonesia
12/4/2011	21:45:27	4.9	-3.98	127.73	180	Seram, Indonesia
12/28/2015	16:26:02	5.3	-3.81	128.41	19	Seram, Indonesia
10/11/2013	11:19:14	4.9	-3.55	128.33	10	Seram, Indonesia
8/17/2015	7:17:14	4.8	-3.73	128.84	9	Seram, Indonesia
5/13/2012	18:24:49	5.1	-3.73	128.87	123	Seram, Indonesia

Time		Mag	Lat	Lon	Depth	Location
6/14/2012	2:17:26	4.8	-3.57	128.95	10	Seram, Indonesia
10/31/2013	4:50:59	4.8	-3.83	129.87	23	Seram, Indonesia
3/26/2012	21:02:20	5	-3.85	130.5	10	Seram, Indonesia
4/6/2011	20:16:27	5	-3.62	130.97	10	Seram, Indonesia
8/30/2012	6:56:44	5.3	-3.34	131.07	53	IrianJaya Region, Indonesia
7/15/2011	18:35:31	4.8	-3.34	130.83	25	Seram, Indonesia
2/9/2012	2:39:40	4.9	-3.27	130.8	10	Seram, Indonesia
2/9/2012	5:09:09	4.9	-3.22	130.82	10	Seram, Indonesia
1/20/2012	12:21:13	4.9	-3.01	130.78	10	Seram, Indonesia
8/16/2011	11:03:58	6	-2.23	128.16	43	Ceram Sea
8/21/2011	6:45:28	4.9	-1.97	128.07	10	Halmahera, Indonesia
1/3/2013	0:02:16	5.3	-1.48	127.5	10	Halmahera, Indonesia
11/14/2011	6:20:04	4.9	-1.12	126.95	10	Southern Molucca Sea
1/1/2013	15:18:36	5	-1.05	126.91	26	Southern Molucca Sea
12/31/2011	6:14:41	4.9	-1.1	126.86	31	Southern Molucca Sea
12/31/2011	4:05:46	4.9	-1.3	126.86	10	Southern Molucca Sea
12/7/2011	13:38:29	5.7	-1.41	126.56	33	Southern Molucca Sea

Time		Mag	Lat	Lon	Depth	Location
2/2/2014	2:59:25	5.1	-1.23	126.3	42	Southern Molucca Sea
2/23/2015	0:48:47	5	-4.41	126.38	372	Banda Sea
4/13/2011	9:57:01	5	-4.7	126.73	390	Banda Sea
6/4/2015	2:34:22	4.8	-4.57	128.14	32	Banda Sea
11/10/2011	2:02:31	4.8	-4.36	130.27	4	Banda Sea
11/18/2011	8:35:21	5	-4.77	130.85	10	Banda Sea
2/10/2013	0:38:44	4.9	-4.38	131.14	58	Banda Sea
3/17/2014	7:12:20	4.9	-3.54	131.57	32	Irian Jaya Region, Indonesia
10/8/2012	22:26:07	5	-4.58	129.26	16	Banda Sea
10/8/2012	12:00:49	5	-4.52	129.23	10	Banda Sea
10/8/2012	11:43:36	6.2	-4.48	129.32	39	Banda Sea
10/8/2012	12:20:53	4.9	-4.47	129.32	32	Banda Sea
12/9/2015	10:41:47	4.9	-4.39	129.49	9	Banda Sea
12/9/2015	10:21:46	6.8	-4.18	129.42	12	Banda Sea
12/9/2015	16:06:08	5.1	-4.14	129.42	12	Banda Sea
12/9/2015	12:17:16	5	-4.13	129.46	10	Banda Sea
12/14/2015	1:34:00	5	-4.15	129.49	11	Banda Sea
12/9/2015	14:14:01	5.4	-4.14	129.51	10	Banda Sea
12/9/2015	12:24:29	4.8	-4.14	129.53	13	Banda Sea
7/9/2011	5:51:42	5.4	-4.1	129.52	49	Banda Sea
12/9/2015	12:50:00	4.9	-4.08	129.5	12	Banda Sea
12/9/2015	14:56:58	5.3	-4.06	129.53	10	Banda Sea
12/9/2015	12:39:08	5.3	-4.09	129.59	10	Banda Sea
12/9/2015	11:15:27	5.2	-4.23	129.65	13	Banda Sea
12/9/2015	12:06:22	5.1	-4.23	129.59	13	Banda Sea
12/14/2015	1:45:58	5.3	-4.2	129.54	14	Banda Sea

Time		Mag	Lat	Lon	Depth	Location
12/9/2015	16:35:23	5	-4.2	129.53	12	Banda Sea
12/9/2015	19:31:52	4.8	-4.19	129.52	9	Banda Sea
12/9/2015	17:07:47	4.8	-4.19	129.5	13	Banda Sea
12/9/2015	20:21:09	4.9	-4.21	129.51	11	Banda Sea
12/10/2015	2:04:40	4.9	-4.23	129.52	11	Banda Sea
2/12/2012	6:28:56	4.8	-4.15	132.51	10	Irian Jaya Region, Indonesia
2/9/2015	23:32:49	4.8	-4.05	132.56	10	Irian Jaya Region, Indonesia
5/3/2014	3:48:46	4.9	-0.99	127.27	10	Halmahera, Indonesia
9/13/2013	4:06:11	5	-1.02	127.14	12	Halmahera, Indonesia
1/18/2012	1:19:36	5.2	-0.88	126.95	37	Southern Molucca Sea
11/14/2011	4:05:11	6.3	-0.93	126.93	16	Southern Molucca Sea
2/11/2012	7:06:51	5.6	-0.95	126.9	36	Southern Molucca Sea
12/9/2011	19:48:37	5	-0.95	126.88	10	Southern Molucca Sea
11/29/2011	7:38:15	5	-0.97	126.84	10	Southern Molucca Sea
7/27/2015	8:52:21	5.1	-0.9	126.89	10	Southern Molucca Sea
11/15/2011	18:27:08	4.9	-0.9	126.88	39	Southern Molucca Sea

Time		Mag	Lat	Lon	Depth	Location
1/18/2012	13:44:21	4.8	-0.89	126.86	25	Southern Molucca Sea
1/18/2012	16:09:12	5	-0.85	126.85	24	Southern Molucca Sea
6/6/2012	4:17:29	4.9	-0.84	126.85	20	Southern Molucca Sea
1/18/2012	12:50:23	5.5	-0.84	126.83	37	Southern Molucca Sea
6/4/2012	16:40:02	4.8	-0.61	127.83	10	Halmahera, Indonesia
10/11/2013	2:45:22	5.1	-0.52	127.18	73	Halmahera, Indonesia
9/18/2011	23:09:20	5.2	-2.11	125.16	19	Ceram Sea
9/21/2014	9:16:35	4.9	-5.3	128.25	339	Banda Sea
7/21/2007	7:55:55	5.3	-3	130.3	15	Seram, Indonesia

LAMPIRAN B
Data Stasiun Perekam Pada Penelitian

Network	Nama Stasiun	Latitude	Longitude	Streams
GE	BNDI	-4.52	129.9	.BHE, .BHN, .BHZ
GE	FAKI	-2.92	132.25	.BHE, .BHN, .BHZ
IA	AAI	-3.69	128.19	.BHE, .BHN, .BHZ
IA	MSAI	-3.35	128.93	.BHE, .BHN, .BHZ
IA	OBMI	-1.34	127.64	.BHE, .BHN, .BHZ
IA	NLAI	-3.24	127.1	.BHE, .BHN, .BHZ
IA	KRAI	-3.32	128.39	.BHE, .BHN, .BHZ
GE	SANI	-2.05	125.99	.BHE, .BHN, .BHZ

LAMPIRAN C
DATA HASIL RELOKASI GEMPA

Event ke-	Latitude	Longitude	Depths	Magnitude
1	-2.95683	130.2627	4.314	5.5
2	-2.89513	130.2171	29.485	5.2
3	-3.01731	130.1007	15.96	4.8
4	-2.90014	129.8686	10.903	5
5	-2.85223	129.8549	22.07	4.9
6	-2.91743	129.8362	16.743	5.2
7	-2.98866	129.8394	24.602	5.1
8	-2.9842	129.7051	4.375	5.3
9	-2.92663	129.6536	30.605	4.9
10	-2.93924	129.4911	52.396	4.8
12	-2.74165	129.5463	13.055	4.9
13	-2.70494	129.5451	17.071	4.8
14	-2.74869	129.4538	17.102	4.8
15	-2.84323	129.3773	34.938	5.4
16	-2.86291	129.3782	32.831	5.6
17	-2.87813	129.3086	17.006	4.9
18	-2.905	129.305	33.461	4.8
19	-3.08568	129.0762	43.11	5
20	-3.27457	128.8061	72.61	4.8
21	-2.54267	128.6475	13.987	4.8
22	-2.83587	128.1147	49.554	5
23	-2.84602	128.0406	31.272	4.9
24	-3.03186	128.1169	37.247	4.9
26	-2.93792	127.6185	30.235	5.1
27	-3.62876	127.4014	11.368	4.9

Event ke-	Latitude	Longitude	Depths	Magnitude
29	-3.77188	127.5123	33.845	5.8
31	-3.81003	128.4293	24.525	5.3
32	-3.57073	128.3126	11.163	4.9
33	-3.67686	128.8475	5.923	4.8
34	-3.69943	128.9237	131.195	5.1
35	-3.62211	128.9284	11.01	4.8
36	-3.73493	129.8751	20.13	4.8
37	-3.87729	130.5339	7.574	5
38	-3.68827	130.912	13.747	5
40	-3.2115	130.795	20.096	4.8
41	-3.26631	130.8006	13.785	4.9
42	-3.23639	130.7909	8.149	4.9
43	-3.12199	130.7672	16.823	4.9
44	-2.22773	128.157	56.63	6
45	-1.99105	128.0581	14.169	4.9
46	-1.53036	127.428	10.698	5.3
47	-1.1054	126.9747	10.138	4.9
48	-1.01754	126.9682	24.672	5
49	-1.09911	126.9141	30.18	4.9
50	-1.25391	126.9583	10.587	4.9
51	-1.38713	126.5322	28.117	5.7
52	-1.26554	126.2904	1.788	5.1
55	-4.51993	128.2134	39.97	4.8
56	-4.35968	130.2391	6.435	4.8
57	-4.79369	130.8542	10.009	5
58	-4.27125	131.1491	28.113	4.9
59	-3.45728	131.6021	24.275	4.9
60	-4.55718	129.2837	11.076	5

Event ke-	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude
61	-4.5058	129.2594	76.193	5
64	-4.18865	129.4657	13.431	6.8
65	-4.11802	129.4562	17.354	5.1
66	-4.13443	129.4649	13.016	5
67	-4.16263	129.477	9.697	5
68	-4.14418	129.5109	9.661	5.4
69	-4.13793	129.5482	15.824	4.8
70	-3.9935	129.5411	32.137	5.4
71	-4.09808	129.5112	11.546	4.9
72	-4.09597	129.4883	10.47	5.3
73	-4.07193	129.598	10.588	5.3
74	-4.22756	129.6389	11.159	5.2
75	-4.22088	129.5805	14.479	5.1
76	-4.17802	129.5174	10.518	5.3
77	-4.1918	129.5195	9.681	5
78	-4.19014	129.5534	10.294	4.8
79	-4.19006	129.5088	14.436	4.8
80	-4.21107	129.4987	8.899	4.9
81	-4.28046	129.5319	9.166	4.9
84	-0.98528	127.2468	8.088	4.9
85	-1.02508	127.1338	12.723	5
86	-0.87739	126.9299	36.126	5.2
87	-0.90789	126.9844	15.251	6.3
88	-0.9497	126.8142	34.545	5.6
89	-0.95056	126.9241	11.786	5
90	-0.95583	126.8649	9.432	5
91	-0.88905	126.8879	13.374	5.1
92	-0.89931	126.8404	36.966	4.9

Event ke-	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude
93	-0.88753	126.8188	25.156	4.8
94	-0.88495	126.8359	28.076	5
95	-0.87138	126.8207	21.986	4.9
96	-0.88966	126.8713	11.606	5.5
97	-0.65292	127.775	7.407	4.8
82	-4.14887	132.5099	10.016	4.8
83	-4.05117	132.5601	9.985	4.8
53	-4.40803	126.3804	371.893	5
54	-4.7017	126.7296	390.101	5

LAMPIRAN D

Script MATLAB

1. Diagram Kompas dan Diagram Rose

```

sudut.m x  sudut.m x
1 - close all;
2 - clear all;
3 - clc
4 - %Menghitung besar perubahan jarak (km) antara hiposenter sebelum direlokasi
5 - %dengan sesudah direlokasi. Menghitung besar perubahan sudut azimuth.
6 - %Membentuk diagram rose dan diagram compass%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
7
8 - lawal = importdata('latawal.txt');
9 - lrelok1 = importdata('latreloc.txt');
10 - %lrelok2 = importdata('lintangrelok2.txt');
11 - awal = importdata('lonawal.txt');
12 - brelok1 = importdata('lonreloc.txt');
13 - %brelok2 = importdata('bujurrelok2.txt');
14 - b1 = (awal-brelok1)*111;
15 - l1 = (lawal-lrelok1)*111;
16
17 - %%SKENARIO 1%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
18 - r1 = [r11;r21;r31;r41];
19 - alpha1 = [theta11;theta21;theta31;theta41];
20 - a1 = alpha1;
21
22 - %%SKENARIO 1%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
23 - figure (11)
24 - g= rose (a1);
25 - title('Diagram Rose')
26
27 - %%SKENARIO 1%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
28 - figure(12)
29 - rdir = a1 * pi/180;
30 - [x1,y1]= pol2cart (rdir,r1);
31 - jk= compass (x1,y1);
32 - title ('Diagram Compass')

```

2. Histogram RMS

Editor - C:\rhcygwin64\home\Ryandi\HYPODD\src\plot gmt\RMS\Histo_rms.m

```
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
[Icons] [1.0] [1.1] [x] [%] [%] [i]
sudut.m* x sudut.m x Histo_rms.m x
1 - clear
2 - load iterasi_1.txt;
3 - load iterasi_5.txt;
4
5 - x = iterasi_5;
6 - figure
7 - hist(x,[0 0.5 1 2]);
8 - title('Histogram Residual RMS reloc')
9 - xlabel('RMS(s)');
10 - ylabel('N Data');
11
12 - y = iterasi_1;
13 - figure
14 - hist(y,[0 0.5 1 2]);
15 - title('Histogram Residual RMS ori')
16 - xlabel('RMS(s)');
17 - ylabel('N Data');
18
```

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di rumah sakit daerah Kabupaten Sidoarjo, dan sekarang tinggal di Surabaya. Lahir pada tanggal 6 Nopember 1994, dan merupakan anak ke-2 dari pasangan Bapak Achmad Adam Malik (Alm) dan Ibu Farida Safiati. Penulis bernama Ryandi Bachrudin Yusuf. Penulis menempuh sekolah awal di TK Al-Fadhilah dan melanjutkan tahap sekolah dasar di SDN

Kebraon 4, kemudian melanjutkan jenjang sekolah ke tingkat SMP di SMP Negeri 21 Surabaya dan tingkat SMA di SMA Negeri 18 Surabaya. Setelah lulus melanjutkan pendidikan S1 di ITS Jurusan Fisika FMIPA melalui tes tulis (SBMPTN). Penulis memilih bidang minat Fisika Bumi selama belajar di Fisika FMIPA ITS. Penulis juga aktif dalam organisasi minat bakat yaitu di IFLS (UKM Bahasa). Selain aktif di bidang minat bakat, penulis juga aktif dalam organisasi kemahasiswaan, yaitu di HIMASIKA ITS periode 2013-2014 sebagai staff KESMA, dan periode 2013-2014 sebagai staff ahli PSDM sebagai Koordinator Instructure Commite (Koor IC). Dalam organisasi bidang fisika bumi yaitu AAPG ITS SC, penulis menjabat sebagai anggota (2013-2014) dan sebagai staff Internal (2014-2015). Selain semua hal diatas, penulis juga aktif di PKM-Penelitian dengan tema pengukuran geofisika.

Penulis dapat dihubungi melalui:

jobasinc@gmail.com

+62857 3376 8787